



Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires. Applications aux sons musicaux

Claude Cadoz

► To cite this version:

Claude Cadoz. Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires. Applications aux sons musicaux. Modélisation et simulation. Institut national polytechnique de Grenoble, 1979. Français. NNT: . tel-01260499

HAL Id: tel-01260499

<https://hal.science/tel-01260499>

Submitted on 26 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

PRESENTEE A
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR 3ème CYCLE

par

CLAUDE CADOZ

*

SYNTHESE SONORE PAR SIMULATION
DE MECANISMES VIBRATOIRES
APPLICATION AUX SONS MUSICAUX

*

Soutenue le 15 OCTOBRE 1979 devant la Commission d'Examen.

JURY

Monsieur	R. LANCIA	Président,
Messieurs	J.C. RISSET	} Examineurs.
	M. DECOUST	
	R. CARRE	
	P. GARDERET	

THESE

PRESENTEE A
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir
LE TITRE DE DOCTEUR 3ème CYCLE

par
CLAUDE CADOZ

*

**SYNTHESE SONORE PAR SIMULATION
DE MECANISMES VIBRATOIRES
APPLICATION AUX SONS MUSICAUX**

*

Président : M. Philippe TRAYNARD
 Vice-Présidents : M. Georges LESPINARD
 M. René PAUTHENET

Année Universitaire

1978-1979

PROFESSEURS TITULAIRES

MM RENOU Jean
 LÉSSON Jean
 SICH Daniel
 BONNETAIN Lucien
 BUNNIER Etienne
 *BOUDOURS Georges
 BRISSONNEAU Pierre
 BOYLE-BODIN Maurice
 COUMES André
 D'URAND Francis
 FELICI Noël
 FOULARD Claude
 LANCIA Roland
 LONGUEUE Jean-Pierre
 LESPINARD Georges
 MOREAU René
 PARIAUD Jean-Charles
 PAUTHENET René
 PERRET René
 POLOWADOFF Michel ROBERT André

 TRAYNARD Philippe
 VEILLON Gérard
 *en congé pour études.

Electronique - Automatique
 Chimie Minérale
 Physique du Solide - Cristallographie
 Génie Chimique
 Métallurgie
 Electronique - Automatique
 Physique du Solide - Cristallographie
 Electronique - Automatique
 Electronique - Automatique
 Métallurgie
 Electronique - Automatique
 Electronique - Automatique
 Electronique - Automatique
 Physique Nucléaire Corpusculaire
 Mécanique
 Mécanique
 Chimie-Physique
 Electronique - Automatique
 Electronique - Automatique
 Electronique - Automatique
 Chimie Appliquée et des Matériaux
 Chimie - Physique
 Informatique fondamentale et appliquée

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM BLIMAN Samuël
 BOUVARD Maurice
 COHEN Joseph
 GUYOT Pierre
 JOUBERT Jean-Claude
 LACOUME Jean-Louis
 ROBERT François
 SABONNADIÈRE Jean-Claude
 ZADWORY François

Electronique - Automatique
 Génie Mécanique
 Electronique - Automatique
 Métallurgie Physique
 Physique du Solide - Cristallographie
 Electronique - Automatique
 Analyse numérique
 Electronique - Automatique
 Electronique - Automatique

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

MM ANCEAU François
 CHARTIER Germain
 Mme CHERUY Arlette
 CHIAVERINA Jean
 IVANES Marcel
 LESIEUR Marcel
 MORET Roger
 PIAU Jean-Michel
 PIERRARD Jean-Marie
 Mme SAUTIER Gabrielle
 SOHM Jean-Claude

Informatique fondamentale et appliquée
 Electronique - Automatique
 Automatique
 Biologie, biochimie, agronomie
 Electronique - Automatique
 Mécanique
 Physique nucléaire - corpusculaire
 Mécanique
 Mécanique
 Informatique fondamentale et appliquée
 Chimie Physique

CHERCHEURS DU C.N.R.S. (Directeur et Maîtres de Recherche)

M FRUCHART Robert	Directeur de Recherche
MM ANSARA Ibrahim	Maître de Recherche
BRONOEL Guy	Maître de Recherche
CARRE René	Maître de Recherche
DAVID René	Maître de Recherche
DRIOLE Jean	Maître de Recherche
KLEITZ Michel	Maître de Recherche
LANDAU Ioan-Doré	Maître de Recherche
MERMET Jean	Maître de Recherche
MINIER Jacques	Maître de Recherche

Personnalités habilitées à diriger des travaux de recherche (Décision du Conseil Scientifique)

E.N.S.E.E.G.

MM BISCONDI Michel	Ecole des Mines ST ETIENNE (dépt. Métallurgie)
BOOS Jean-Yves	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
DRIVER Julian	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
KOBYLANSKI André	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
LE COZE Jean	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
IESBATS Pierre	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
RIEU Jean	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
SAINFORT	Ecole des Mines ST ETIENNE (Métallurgie)
SOUQUET Jean-Louis	C.E.N. GRENOBLE (Métallurgie)
CAILLET Marcel	U.S.M.G.
COULON Michel	E.N.S.E.E.G. (Chimie Minérale Physique)
GUILHOT Bernard	E.N.S.E.E.G. (Chimie Minérale Physique)
LALAUZE René	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)
LANCELOT Francis	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)
SARRAZIN Pierre	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)
SOUSTELLE Michel	E.N.S.E.E.G. (Chimie Minérale Physique)
THEVENOT François	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)
THOMAS Gérard	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)
TOUZAIN Philippe	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)
TRAN MINH Canh	E.N.S.E.E.G. (Chimie Minérale Physique)
	Ecole des Mines ST ETIENNE (Chim.Min.Ph)

E.N.S.E.R.G.

MM BOREL Joseph	Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE
KAMARINOS Georges	Centre National Recherche Scientifique

E.N.S.E.G.P.

MM BORNARD Guy	Centre National Recherche Scientifique
DAVID René	Centre National Recherche Scientifique
DESCHIZEAUX Pierre	Centre National Recherche Scientifique

E.N.S.I.M.A.G.

MM COURTIN Jacques	Université des Sciences Sociales
LATOMBE Jean-Claude	Institut National Polytechnique GRENOBLE
LUCAS Michel	Université Scientifique et Médicale GRENOBLE

S O M M A I R E

INTRODUCTION GENERALE

PREMIÈRE PARTIE : La synthèse musicale à l'aide de l'ordinateur.
Le système MUSIC V. L'ordinateur comme "moyen de Représentation".

1.1. LA SYNTHÈSE SONORE. LE SYSTÈME MUSIC V.

1.1.1. Music V. Le formalisme.

1.1.1.1. Éléments et combinatoire

1.1.1.2. Les modules élémentaires ØSC et ENV

1.1.1.3. Les autres modules

1.1.1.4. La combinatoire

1.1.2. Le mode opératoire.

1.1.2.1. Description des instruments

1.1.2.2. Description des notes

1.1.2.3. Remarque sur la séparation en "instruments" et "notes"

1.1.3. Music V. Expériences et réalisations.

1.2. LA "REPRÉSENTATION".

1.3. LA "REPRÉSENTATION" AVEC MUSIC V.

DEUXIÈME PARTIE : Système général pour la simulation d'instruments.
Le système CORDIS.

2.1. L'INSTRUMENT.

2.1.1. L'instrument, objet concret. Globalité sensorielle. L'"espace gestuel".

2.1.2. En amont et en aval de l'instrument.

2.1.2.1. Prestructuration/Jeu

2.1.2.2. La mémorisation

2.2. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL GLOBAL.

2.2.1. Le système gestuel.

2.2.1.1. Gestes d'excitation et d'entretien

2.2.1.2. Gestes de modification de structure

2.2.2. Le système sonore.

2.2.3. Le système visuel.

2.2.4. La coordination des trois systèmes.

2.3. LE SYSTEME SONORE, ETUDE LOGICIELLE. LE PROGRAMME CORDIS.

2.3.1. Simulation d'une particule vibrante. Processus récursifs.

2.3.2. Algorithmes de base. Simulation d'éléments mécaniques.

2.3.2.1. Représentation de la masse

2.3.2.2. Représentation des éléments élastiques et de frottement

2.3.2.3. Généralisation

2.3.3. Le programme CORDIS.

2.3.3.1. CORDIS. Première PASSE. CORDS 1

2.3.3.2. CORDIS. Deuxième PASSE. CORDS 2

2.3.3.3. CORDIS. Troisième PASSE. CORDS 3

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Radioélectrique de Grenoble (E.N.S.E.R.G.). Je remercie vivement Monsieur le Professeur M. BUYLE-BODIN, Directeur de l'E.N.S.E.R.G. pour l'accueil qu'il a réservé à notre équipe dans cet établissement.

J'exprime ma vive reconnaissance à Monsieur le Professeur R. LANCIA, Directeur du Laboratoire de la Communication Parlée et de l'Instrumentation de Mesure, pour les encouragements et la bienveillance qu'il a toujours montrés envers nos travaux en liaison avec ce laboratoire. Je le remercie également d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur J.C. RISSET qui s'est intéressé à nos travaux dès leur origine et qui, autant par ses conseils que par l'écoute et la critique très attentives de nos projets nous a, à chaque étape, apporté un encouragement essentiel. Je le remercie aussi d'avoir bien voulu participer à mon jury.

J'adresse mes vifs remerciements au Ministère de la Culture et de la Communication grâce au soutien duquel ces travaux ont pu voir le jour et se développer dans le cadre de l'équipe de l'ACROE. Je remercie en particulier Monsieur M. DECOUST, Inspecteur Principal de la Musique qui a bien voulu, en témoignage de l'intérêt qu'il porte à nos recherches, faire partie du jury de cette thèse.

J'exprime ma vive reconnaissance à Monsieur R. CARRE, Maître de Recherche au C.N.R.S., pour sa bienveillance, ses conseils et ses encouragements, lesquels ont permis le développement de notre projet dans l'esprit selon lequel il avait été posé.

L'avancement de mes travaux a été grandement facilité par l'ambiance d'amitié et de coopération qui règne dans ce laboratoire. Je tiens à remercier tous les chercheurs de ce laboratoire ainsi que les personnes de son équipe technique.

J'exprime ma reconnaissance aux membres de l'équipe de l'ACROE avec qui je partage la responsabilité de l'aboutissement de ces travaux.

Enfin, je ne saurais manquer de remercier le service de dactylographie et de reprographie de l'E.N.S.E.R.G., et en particulier Mademoiselle MERKLEN, Mademoiselle GERBER et Mademoiselle CASALI ainsi que Monsieur DANIEL pour l'excellente impression de ce mémoire.

*
* *
*

INTRODUCTION GENERALE

L'intervention de l'électronique dans la technologie des instruments, plus généralement des dispositifs matériels pour la création et la production musicales, remonte aux années 20, avec le *TRAUTONIUM* et l'*ONDE MARTENOT* (1928). Cependant, c'est en 1948 avec SCHAEFFER, à Paris, puis en 1950 avec HEIMERT, à Cologne, par la *MUSIQUE CONCRETE* et la *MUSIQUE ELECTRONIQUE*, que les technologies contemporaines font leur véritable entrée dans le domaine musical. Dès lors, la question de la relation entre l'outil technique et les démarches musicales se pose comme un problème entier. L'informatique, quelques années plus tard, avec l'expérience de *COMPOSITION AUTOMATIQUE* (suite Illiac) réalisée, en 1956, par HILLER et ISAACSON à l'Université d'Illinois (U.S.A.), entre en jeu et introduit une nouvelle dimension au problème.

Au début des années 60, l'ordinateur est utilisé dans une autre perspective : la *SYNTHESE DIRECTE*, à partir des programmes élaborés par l'équipe de MATHEWS, MILLER, MOORE, PIERCE et RISSET, à la Bell-Telephone. La synthèse numérique directe ouvre également, avec le programme MUSIC V [1], une voie de recherche déterminante.

De 1948 à aujourd'hui, le développement et la diversité des démarches sont tels qu'il n'est plus possible d'appliquer aux différents outils et aux différentes expériences, les critères bien établis dans le contexte traditionnel, au niveau des fonctions respectives de l'instrument, de l'instrumentiste, du luthier, du compositeur... Quelques points de repère généraux peuvent cependant être dégagés dans une première approche.

Tout d'abord, les technologies en cause procèdent de deux époques : l'électronique analogique au départ, puis l'électronique numérique qui la remplace progressivement sans toutefois, encore aujourd'hui, l'avoir supplantée totalement. Selon qu'elles se fondent sur l'une ou sur l'autre, les démarches seront de natures différentes.

On peut en donner une classification très schématique en s'appuyant sur un autre critère simple : Dans le processus de production d'une structure sonore, on peut distinguer deux phases complémentaires, la production du son lui-même, dans sa *MICROSTRUCTURE* et la composition des sons en structures complexes (*MACROSTRUCTURE*).

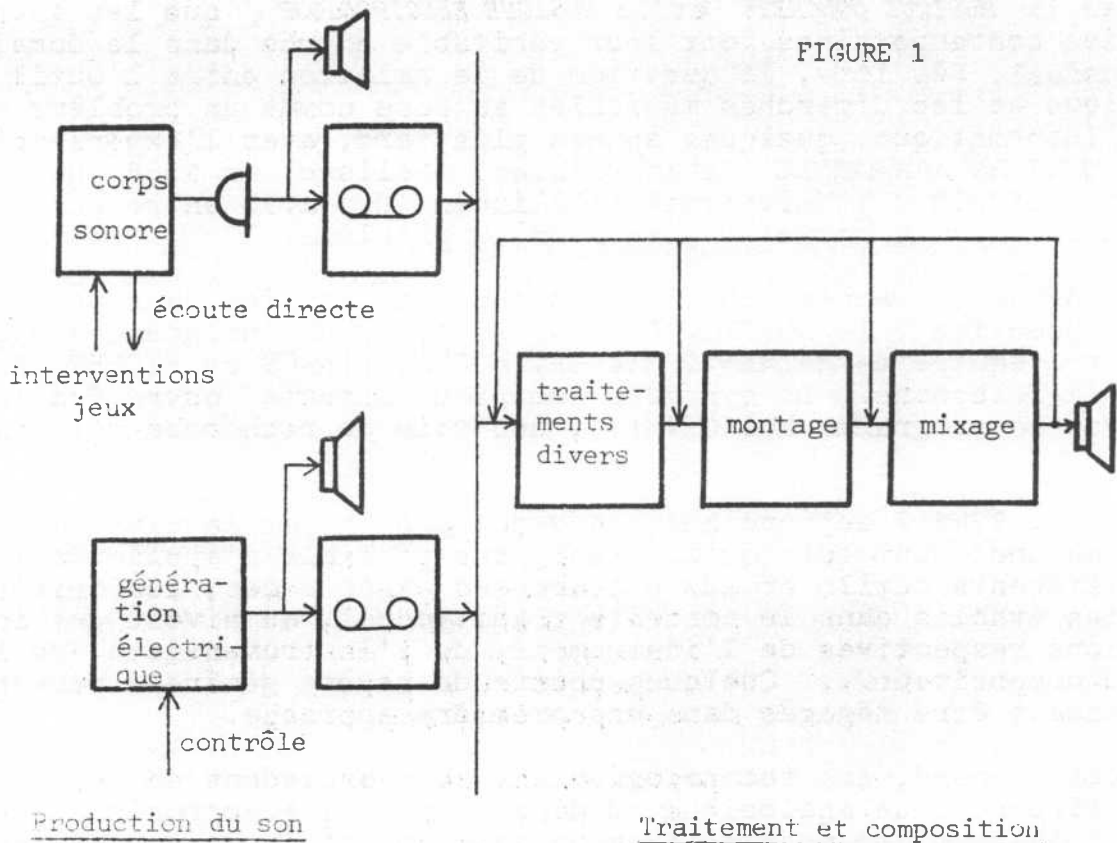
LA MUSIQUE CONCRETE [2], [3] ET LA MUSIQUE ELECTRONIQUE

Elles sont rassemblées aujourd'hui sous un terme global : les musiques **Electroacoustiques**. Elles font appel aux techniques de la prise de son, du montage, du mixage, des différents traitements tels que le filtrage, etc., ainsi qu'aux techniques de la génération analogique.

Les dispositifs en cause sont exclusivement analogiques : magnétophone, filtre, générateur de signaux...

Elles ont en commun le fait que la phase d'organisation des sons a lieu en aval de leur génération. Elles diffèrent par un point essentiel : dans la musique concrète, le son a une origine naturelle, émis par des "corps sonores" réels, corps vibrants simples ou éléments d'instruments. Dans la musique électronique, par contre, le son n'a aucune existence acoustique en amont de la membrane du haut-parleur.

On peut caractériser ces deux démarches par un diagramme :



LA COMPOSITION AUTOMATIQUE A L'AIDE DE L'ORDINATEUR

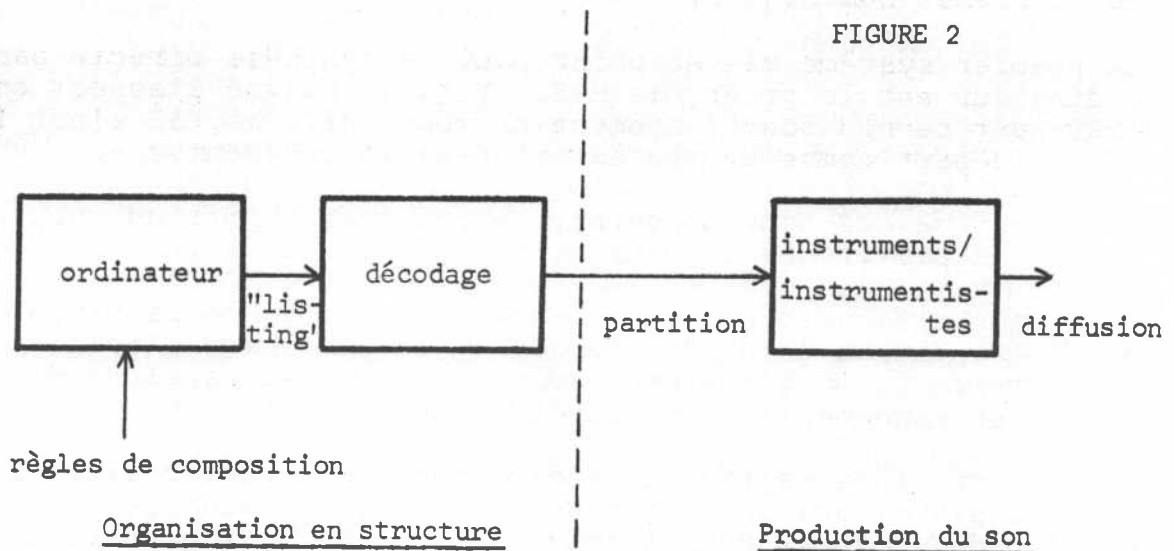
BARBAUD [4] et XENAKIS [5] ont recours à l'ordinateur pour organiser les sons en structures complexes. La production du son reste alors, en bout de chaîne, le fait d'instruments et d'instrumentistes. Les sons instrumentaux sont caractérisés par un certain nombre de paramètres : hauteur, intensité, durée, etc., dont les différentes valeurs et variations seront déterminées

par l'ordinateur en fonction de règles de composition. Ce sont ces règles, issues d'une analyse classique (dans le cas de BARBAUD en particulier) ou procédant de formulations nouvelles, qui constituent les données de programmation de l'ordinateur.

La réalisation d'une séquence particulière, compte tenu des règles initiales dans la formulation desquelles le "compositeur" aura pu adopter une certaine originalité, est alors le fait, non plus de ce compositeur, mais d'un processus aléatoire (aisément programmable) qui proposera des configurations acceptées ou rejetées en fonction des règles.

La séquence sonore se présente alors sous une forme codée fournie par l'ordinateur, qu'il faut traduire en une partition exécutable par les instrumentistes.

Par rapport au cas précédent, la chaîne, ici, est inverse :



L'intérêt de telles démarches est toutefois relatif. Dans le cas où sont mises en oeuvre des règles "classiques", l'apport est surtout important au niveau analytique par la nécessité d'élaborer une formulation rigoureuse et exhaustive de ces règles en fonction d'un langage informatique. Cependant, les limites de la machine apparaissent rapidement et il semble exclu de lui faire ainsi "assimiler" toutes les règles antérieures de la composition.

Dans le cas, comme chez XENAKIS, de la mise en oeuvre de formulations nouvelles, le problème est de savoir si, la forme étant "algorithmiquement" définie, la perception esthétique réside principalement dans la perception de cette forme, et si, le cas échéant, le recours à une traduction acoustique de l'algorithme est le meilleur moyen de l'appréhender.

LA SYNTHÈSE DIRECTE

L'ordinateur est utilisé cette fois aux deux niveaux : A l'opposé du cas précédent, il permet la prise en charge de l'évènement sonore à la fois au niveau microstructurel et au niveau macrostructurel.

De même que dans la synthèse analogique, l'évènement sonore n'a pas d'existence acoustique en amont du haut-parleur. Ce dernier est excité par une onde électrique issue de la conversion numérique / analogique d'une suite d'échantillons calculés par la machine en fonction des spécifications d'entrée.

L'intérêt du numérique par rapport à l'analogique s'affirme ici, au niveau de la finesse de contrôle, de la complexité et de la reproductibilité des signaux. Les performances n'ont ici plus rien à voir avec celles du synthétiseur analogique. Le développement des synthétiseurs numériques, dans le prolongement de la synthèse par ordinateur, permet progressivement de franchir le dernier obstacle qui laissait encore un avantage aux synthétiseurs analogiques : le "temps différé". On peut penser que, dans un avenir proche, ces derniers laisseront définitivement la place aux systèmes numériques.

Le premier système mis au point pour la synthèse directe par ordinateur est le programme MUSIC V [1]. Malgré l'aspect contraignant de son fonctionnement en temps différé, il s'est imposé dès le départ comme un système général et cohérent.

C'est, en ce qui nous concerne, le point de départ que nous avons adopté, à partir des travaux de MATHEWS et RISSET.

Nous nous attacherons, dans la première partie de ce rapport, à une présentation de MUSIC V* dont l'analyse est à l'origine de notre travail. Cette présentation nous permettra alors d'introduire les fondements de notre démarche.

Dans la deuxième partie, nous décrirons, en premier lieu, le dispositif global qui en constitue la base expérimentale, puis le système de synthèse CORDIS dont l'étude logicielle préfigurative était le but de ce travail. Viendra en effet, dans le prolongement de cette étude, la construction d'un système câblé dont nous avons ainsi défini les principes de base.

* MUSIC V est, en fait, l'un des représentants d'une série de programmes fondés sur les mêmes bases : MUSIC 4, MUSIC 7, MUSIC 10, MUSIC 11, 300, les derniers correspondant à des versions plus élaborées.

PREMIERE PARTIE

LA SYNTHÈSE MUSICALE À L'AIDE DE L'ORDINATEUR

LE SYSTÈME MUSIC V

L'ORDINATEUR COMME " MOYEN DE REPRÉSENTATION "

Dans cette première partie, nous abordons le problème, au travers de l'analyse de MUSIC V, au niveau de principes généraux qui n'ont qu'un rapport très lointain avec des préoccupations d'ordre purement électronique. Cette approche nous a paru cependant nécessaire pour expliciter les tenants et aboutissants d'une recherche que nous croyons fondamentale.

La préoccupation qui apparaîtra de manière permanente dans cet exposé est relative au rapport complexe qui s'établit entre le contexte matériel, déterminé par la nature, la technologie des outils, et les processus de création, ici sonore.

1.1. LA SYNTHÈSE SONORE - LE SYSTÈME MUSIC V

En premier lieu, c'est sur le terme synthèse que nous nous arrêterons.

Nous avons opposé, dans l'introduction, deux modes de production sonore : d'un côté, dans la musique concrète, de même que dans la musique instrumentale en général, le son a une origine acoustique naturelle. De l'autre, qu'il s'agisse de génération électronique analogique ou numérique, le son "n'existe pas" en amont du haut-parleur. C'est dans ce dernier cas que le terme "synthèse sonore" a été introduit.

L'idée recouvre en fait plusieurs aspects : Le premier implique deux termes symétriques et met en présence deux facteurs : l'*objet de référence* et un *système* qui permettra, partant du tout pour aller vers ses constituants, l'analyse puis, en sens inverse, la synthèse de l'objet.

Dans la synthèse de corps chimiques, par exemple, les éléments et le tout appartiennent au même ensemble. Dans le cas de la synthèse sonore, la situation diffère par le fait que les éléments de base n'appartiennent pas au domaine des objets sonores. Apparaît ainsi un deuxième aspect : le caractère "artificiel" de ces éléments (en fait les signaux électriques) qui s'oppose au "naturel" des sons dont l'origine est mécanique : les objets vibrants, les corps sonores accumulés pour la prise de son, les instruments, simples ou élaborés..., dont l'origine causale peut être identifiée et surtout faire l'objet de perceptions autres qu'auditives : visuelle, tactile...

Ainsi, dans le cas de la synthèse sonore où l'objet de référence est, globalement, l'espace des événements sonores, le système inclut en fait aussi bien les éléments constitutants que les lois déterminant leurs combinaisons. L'objet de référence et le système appartiennent à deux domaines différents. Leurs liens et leur indépendance relative introduisent alors une problématique particulière.

C'est ce que nous tenterons de mettre en évidence dans la présentation de MUSIC V que nous aborderons maintenant selon trois plans : Dans une description rapide des principes de base, nous essayerons de dégager quelques facteurs qui ont pu déterminer leur forme initiale.

Nous donnerons ensuite quelques éléments relatifs au mode opératoire qui permet leur mise en oeuvre.

Nous évoquerons enfin quelques-unes des expériences et réalisations significatives suscitées par ce système.

1.1.1. MUSIC V - Le formalisme

Nous désignons par "formalisme" propre au système, l'ensemble des fonctions correspondant aux *éléments de base* et à la *combinatoire* qui définit les règles particulières de leur association.

La dépendance du système et de l'objet* est le fait d'un choix initial qui se concrétise dans la définition des algorithmes du programme. Ce choix résulte de la recherche d'un point de concours entre trois directions d'analyse :

- l'analyse physique des signaux sonores, faisant appel aux appareils et à la formulation mathématique de l'acousticien,
- l'analyse perceptive : psychoacoustique au niveau élémentaire, esthétique au niveau des phénomènes complexes où entrent en ligne de compte l'histoire et les conditionnements culturels,
- l'aspect algorithmique où le donné réside dans les fonctions de base de la machine avec lesquelles il faudra "composer".

* Nous employons ici le terme "objet" à propos du sonore dans un sens plus large que dans la notion d'"objet sonore" chez SCHAEFFER où, à l'"objectivité" de l'objet" s'ajoute son aspect élémentaire. Chez SCHAEFFER, objet s'oppose ainsi à structure. Dans notre utilisation, les objets sont en fait éléments ou *structures* "objectives" par opposition à "subjectives".

1.1.1.1. ELEMENTS ET COMBINATOIRE

La première particularité du formalisme de MUSIC V est de partager la détermination des événements sonores en deux phases : la définition d'une "structure - instrument" capable de produire une variété de sons ayant en commun certaines caractéristiques permanentes, la définition de "notes jouées" sur cet instrument.

L'instrument se présente comme un dispositif établissant une relation entre un certain nombre d'entrées de contrôle et une sortie* fournissant l'onde sonore sous sa forme échantillonnée. C'est en précisant la valeur ou l'évolution des entrées que l'on définira chaque note.

Le dispositif correspond à un assemblage de modules remplissant des fonctions élémentaires. Ce sont ces modules qui constituent les éléments de base. Les règles permettant de les assembler par connexions des sorties et des entrées définissent la combinatoire.

1.1.1.2. LES MODULES ELEMENTAIRES ØSC ET ENV

Les deux modules fondamentaux sont l'oscillateur (code : ØSC) et le générateur d'enveloppe (code : ENV).

Nous les décrivons selon les trois axes évoqués plus haut :

a) Sur le plan acoustique

L'OSCILLATEUR

Il produit un signal périodique par reproduction d'une forme définie par une fonction (F_n) correspondant à l'évolution du signal sur une période.

L'amplitude et la fréquence du signal de sortie sont déterminées par les entrées A et F.

Le spectre du signal dépend donc de la forme de F_n . Il se réduira à une raie unique si celle-ci représente la période d'une sinusoïde, à une série de raies harmoniques dans le cas où F_n a une forme quelconque.

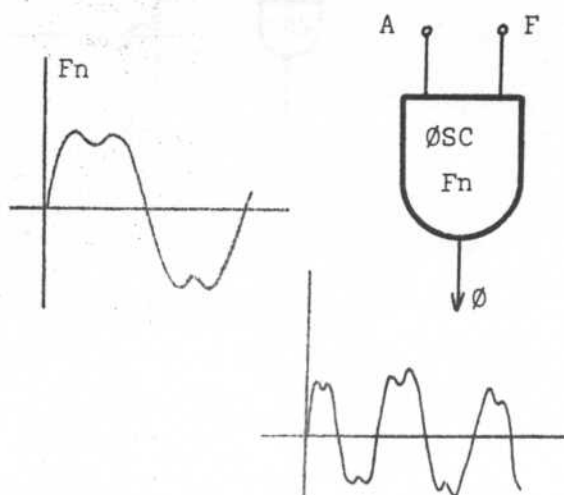


FIGURE 3

* Deux sorties dans le cas d'une production stéréophonique.

LE GENERATEUR D'ENVELOPPE

A la différence du précédent, le signal produit ici ne correspond pas, isolément à un phénomène audible. Le générateur d'enveloppe ne peut être utilisé que combiné à un autre module dont il contrôlera un des paramètres. De même que pour l'oscillateur, cependant, le signal est élaboré à partir d'une fonction (F_m) prédéterminée. Celle-ci est composée de trois parties dont la durée pourra être modifiée par la valeur des entrées I1, I2 et I3. L'entrée A permet d'appliquer un facteur d'amplitude.

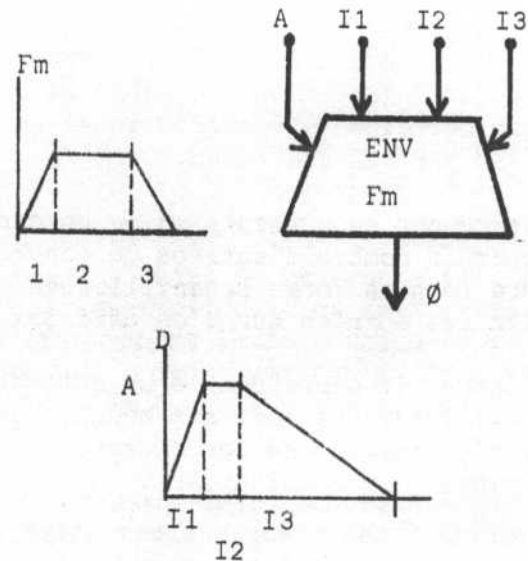


FIGURE 4

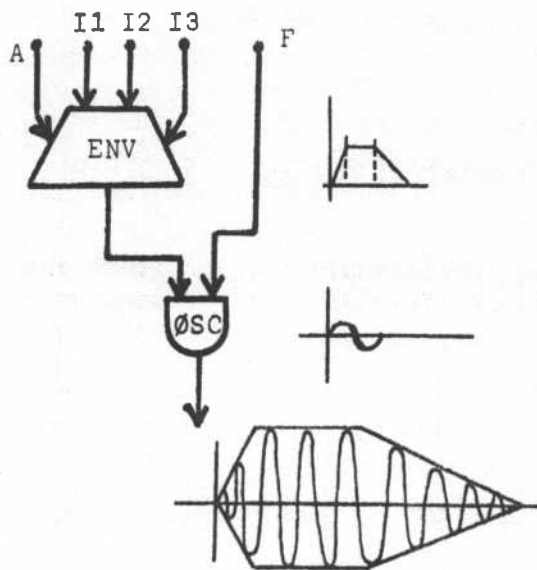


FIGURE 5

La combinaison immédiate de ces deux premiers modules consiste à conférer à l'enveloppe du signal de l'oscillateur, la forme produite par le générateur d'enveloppe en modulant l'amplitude du premier par le signal de sortie du second.

Le signal de sortie de l'oscillateur acquiert ainsi une forme dynamique caractérisée par son attaque, son maintien et son amortissement.

b) Sur le plan perceptif

Ces fonctions semblent directement issues des possibilités propres à la génération et au traitement électroniques : générateurs de fréquence, de signaux sinusoïaux, carrés, en dents de scie..., modulation d'amplitude.

En fait, on peut mettre en évidence un lien tout aussi direct, à ce niveau élémentaire, avec le premier critère de perception évoqué par SCHAEFFER dans sa "Morphologie des objets sonores" : le couple Forme/Matière.

Plusieurs remarques s'imposent alors :

- SCHAEFFER introduit en première approche les notions de Forme et de Matière sonores de la manière suivante :

"Imaginons qu'il nous soit possible "d'arrêter" un son, pour entendre ce qu'il est, à un moment donné de notre écoute : ce que nous saisissons alors, c'est ce que nous appellerons sa *matière* (...). Écoutons maintenant l'histoire du son : nous prenons alors conscience de l'évolution dans la durée de ce qui avait été fixé pour un instant, d'un trajet qui façonne cette matière." ([2] p. 400).

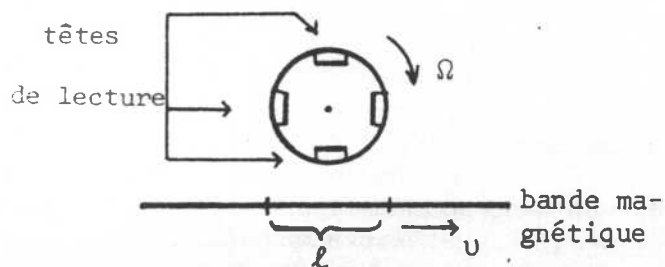
La genèse de ce critère a lieu dans le cadre d'expériences d'écoute (menées par l'équipe qui constituera le Groupe de Recherche Musicale autour de SCHAEFFER) des objets sonores en général. A ce titre, on peut supposer qu'il est issu exclusivement de l'analyse du comportement perceptif libéré de la référence aux causalités du son (écoute réduite, ou "acousmatique"). Cependant, il semble difficile d'imaginer que la référence aux dispositifs électroniques, qui constituent l'essentiel du contexte expérimental, ait été complètement absente. L'idée de matière vient-elle alors de la référence aux générateurs et à leur stabilité, ou bien ceux-ci ne sont-ils que des moyens particuliers de produire à "l'état pur" un caractère sonore dont l'identification est une donnée inhérente à l'oreille, indépendamment de tout conditionnement expérimental.

Quoi qu'il en soit, les critères de forme et de matière semblent avoir démontré leur utilité et leur intérêt comme premiers repères perceptifs pour l'analyse du sonore. Il est probable que la genèse du formalisme de MUSIC V ait un certain rapport avec cette approche. L'oscillateur et le générateur d'enveloppe apparaissent à un niveau élémentaire, respectivement comme générateurs de matière et de forme.

c) Sur le plan algorithmique

Un autre rapport peut être observé : "arrêter un son..." est une expérience objectivement irréalisable. Il existe cependant, dans l'"arsenal" de la musique concrète, un dispositif qui correspond en partie à cet idéal : le "phonogène universel" construit par SPRINGER ([2] p. 425). Cet appareil, un peu grossier dans son principe, permet dans une certaine mesure de disposer du temps et d'étaler la matière d'un son quelconque sur une durée indéterminée.

Par un jeu de têtes de lectures magnétiques montées sur un cylindre dont on contrôle la vitesse de rotation, on peut effectuer une relecture indéfinie de la même portion de bande magnétique.



Si la bande magnétique est fixe et la vitesse telle que la vitesse linéaire des têtes par rapport à la bande correspond à une vitesse de lecture normale, la même portion de bande est lue successivement, à cette vitesse, par les quatre têtes. Les signaux recueillis par celles-ci sont additionnés. On obtient ainsi une sorte de fondu enchaîné des lectures successives de la même séquence sonore.

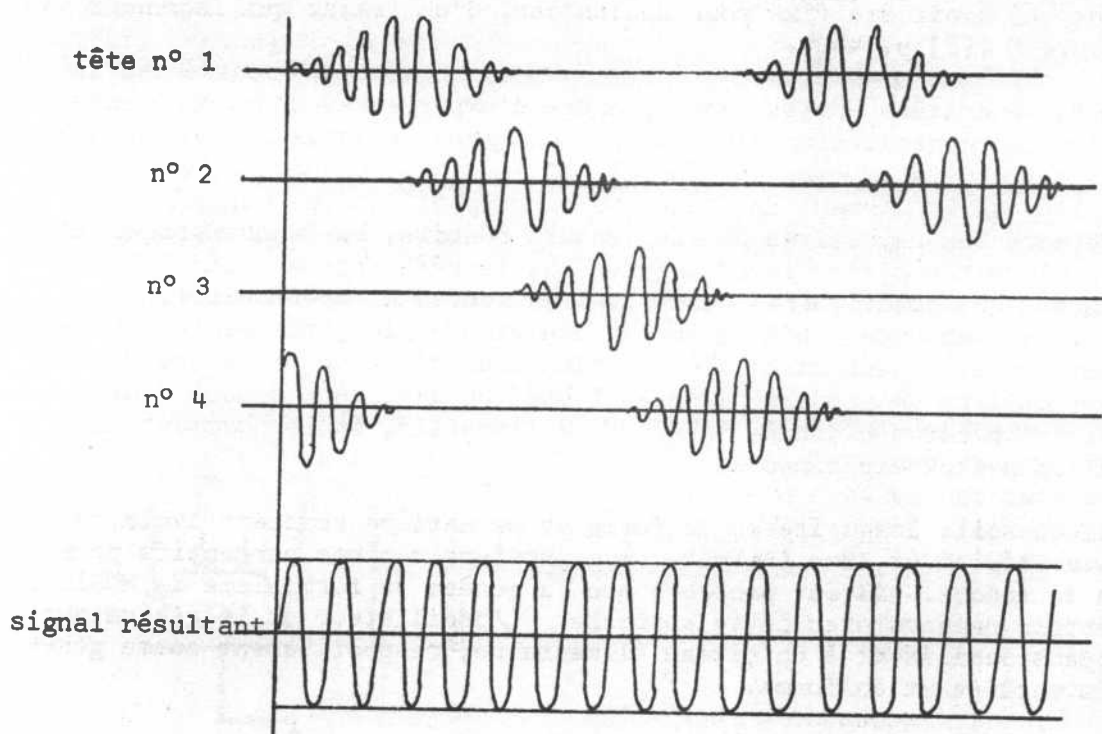


FIGURE 6

L'algorithme mis en oeuvre par MATHEWS, dans l'oscillateur de MUSIC V, est en fait une transposition au niveau du traitement numérique, du même principe. Bénéficiant du degré de résolution propre au traitement numérique, il opère par une relecture d'une portion du signal sonore, réduite cette fois à la longueur nécessaire et suffisante pour définir la matière : la période de l'oscillation.

C'est le premier algorithme spécifique du système. Nous en donnerons une description rapide.

La fonction F_n est stockée sous la forme d'un tableau de 512 mots de 16 bits, en mémoire centrale. On peut représenter ce tableau par la figure inscrite dans un rectangle :

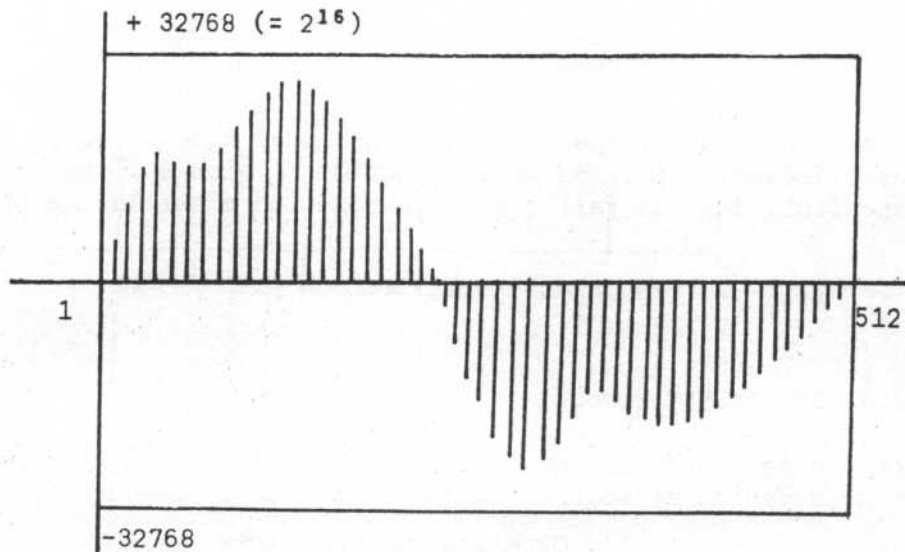


FIGURE 7

Le fonctionnement de l'oscillateur consiste en une lecture des échantillons successifs qui deviennent alors les échantillons de sortie. Lorsque le tableau est lu entièrement, le processus se poursuit en repartant du premier échantillon. L'application des paramètres A et F revient à faire varier l'amplitude et la fréquence en modifiant les deux dimensions du rectangle.

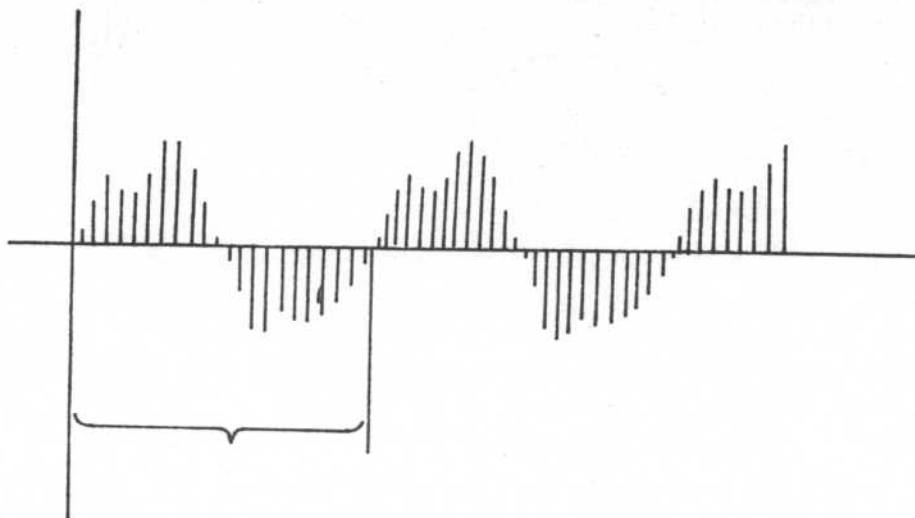


FIGURE 8

La fréquence d'échantillonnage étant constante, les variations de la longueur ne peuvent être obtenues que par un procédé particulier : lecture multiple d'un même échantillon, augmentant ainsi le nombre d'échantillons dans une période, saut de plusieurs échantillons, diminuant ce nombre (cf. [1] p. 49).

Le générateur d'enveloppe fonctionne selon le même principe pour la variation des différentes parties de la fonction F_m stockée. La différence réside, cependant, dans le fait que cette fonction n'est lue qu'une seule fois.

1.1.1.3. LES AUTRES MODULES

L'ensemble des fonctions de tous les modules peut être classé en quatre types dont nous venons de voir un exemple pour chacun des deux premiers :

1. Générateurs de matières
2. Générateurs de formes
3. Transformateur de matière
4. Modules de liaison.

Nous décrirons très rapidement ici les autres modules intervenant dans le système.

a) Générateur de fonction aléatoire (code : RAN)

Il peut être considéré également comme un générateur de matière. Complémentaire de l'oscillateur, il fournit un signal essentiellement non périodique : une suite d'échantillons d'amplitude aléatoire. La fréquence centrale du spectre du "bruit" obtenu est contrôlée par I1, la bande passante par I2.

Pour reprendre les termes de la morphologie des objets sonores de SCHAEFFER, alors que l'oscillateur donnait une matière de hauteur repérable : un son tonique, celui-ci donne une matière de hauteur floue, ou même complètement indistincte : bruit coloré, bruit blanc. Dans le tableau des matières sonores, de SCHAEFFER ([2] p. 518), les deux modules (oscillateur et générateur aléatoire) sont opposés.

L'algorithme mis en oeuvre est le deuxième algorithme spécifique : la génération de la suite d'échantillons aléatoire est obtenue par un processus récursif - multiplication de l'échantillon précédent par une certaine constante - et par la troncature du résultat - due au dépassement de capacité des mots-mémoires - . La modification de la bande passante est obtenue par simple élimination dans la suite des échantillons calculés initialement, d'un certain nombre d'entre eux, et par interpolation linéaire.

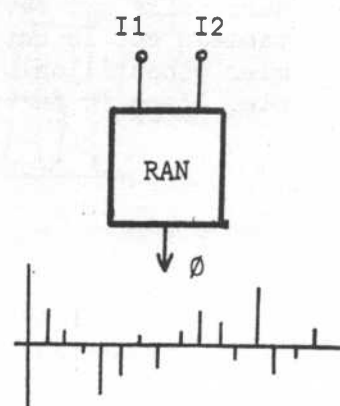


FIGURE 9

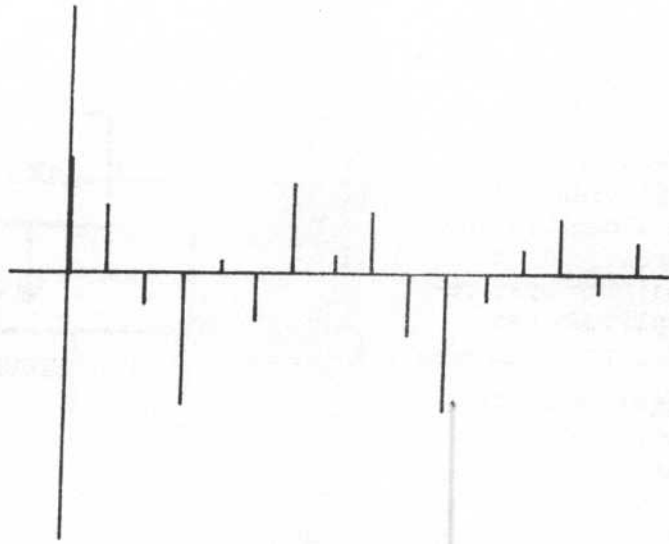


FIGURE 10

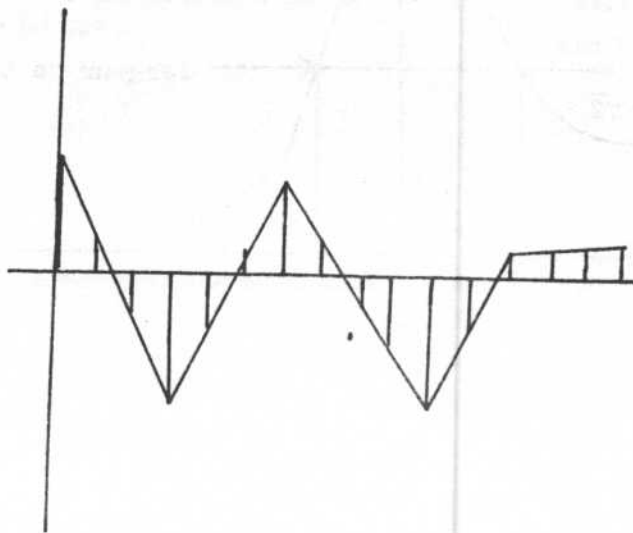


FIGURE 11

b) Le filtre (code : FLT)

C'est un filtre numérique du second ordre. Il s'agit du troisième algorithme spécifique utilisé dans l'ensemble du programme. Il intervient dans la classe des transformateurs de matière puisqu'aussi bien, agissant sur le signal de l'oscillateur ou du générateur de bruit, il en transformera la composition spectrale (au niveau de l'amplitude des composantes).

I1 est l'entrée du signal à filtrer.
I2 contrôle la fréquence de résonance.
I3 contrôle la largeur de bande.
 \emptyset est la sortie.

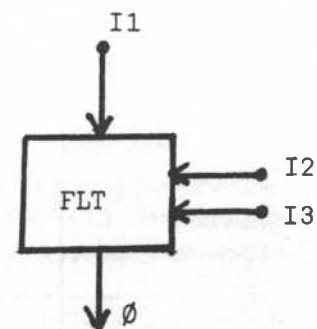


FIGURE 12

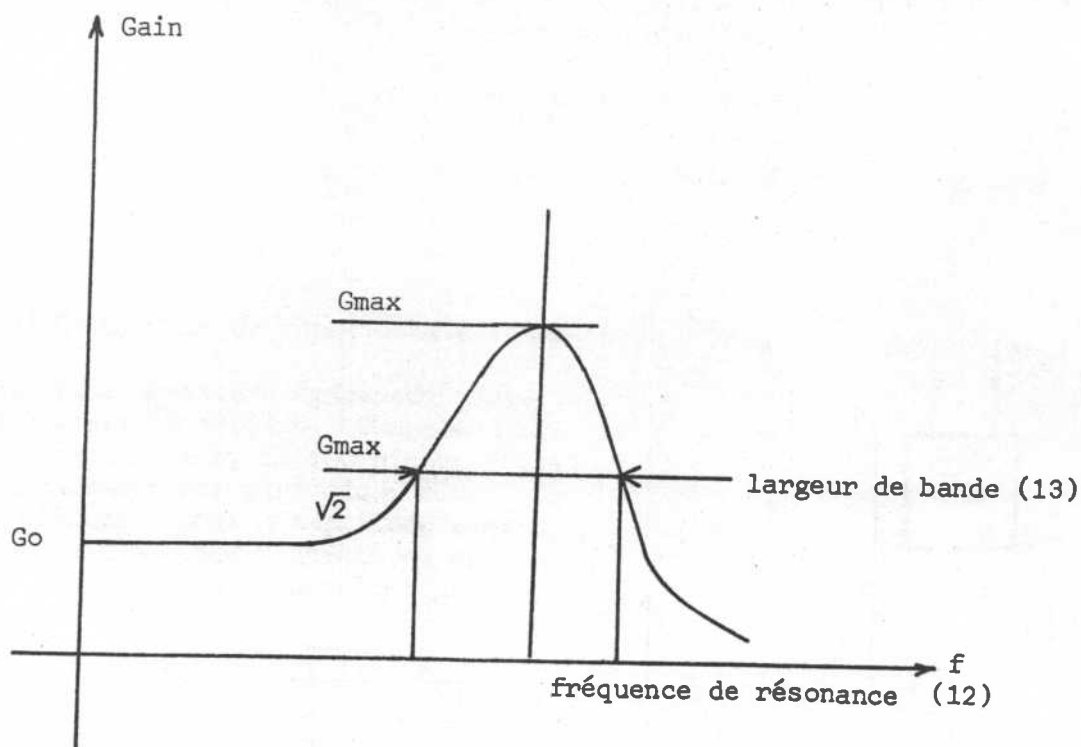
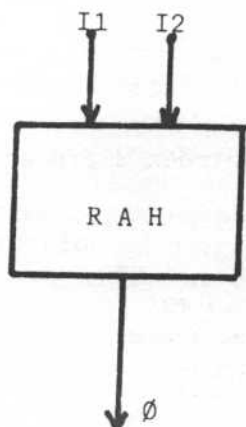


FIGURE 13

c) Générateur "RAH" (Figure 14 et Figure 15).

Le générateur "RAH", qui produit une suite de paliers aléatoires à partir de la même génération d'échantillons aléatoires que dans "RAN", peut être classé dans les générateurs de forme. A l'opposé du générateur d'enveloppe, dans lequel chaque instant est contrôlé avec précision, le contrôle est, ici, global. Il porte sur des données "statistiques" telles que l'ambitus et l'amplitude moyenne des variations des niveaux. La fréquence de ces variations est, par contre, parfaitement définie.

Symbole



I1 : amplitude

I2 : nombre d'échantillons maintenus à la même valeur, "Hold")

Ø : sortie

FIGURE 14

d) Modules de liaison

Les modules de liaison permettent d'associer plusieurs sorties entre elles, par addition ou par multiplication, pour les relier à une seule entrée d'un module consécutif.

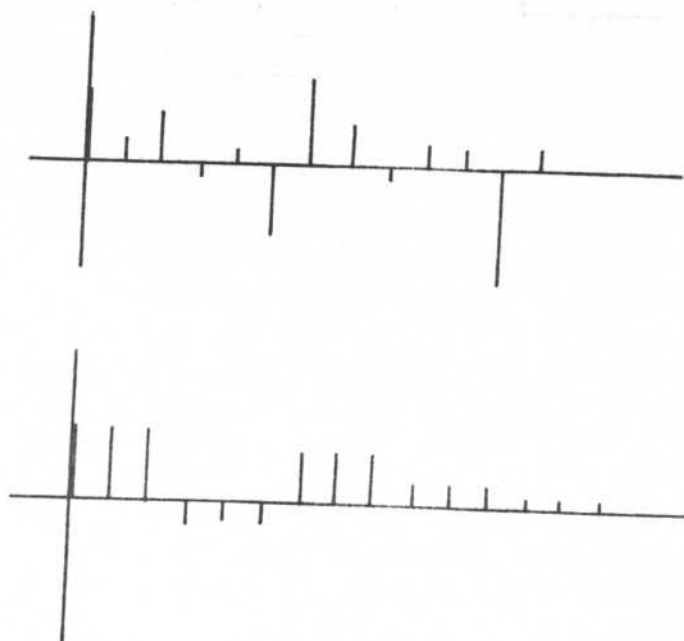


FIGURE 15

1.1.1.4. LA COMBINATOIRE

La combinaison des modules se déduit des fonctions qu'ils remplissent. Elle consiste en général à relier des sorties aux entrées de modules consécutifs. Les règles sont alors les suivantes :

- * une entrée ne peut recevoir (sans l'intermédiaire d'un module de liaison) qu'une seule sortie.
- * une même sortie peut être distribuée à plusieurs entrées différentes.

La structure aura donc un aspect d'arborescence :

- ascendante si l'on fait usage de modules de liaison ou si plusieurs modules convergent vers plusieurs entrées d'un même module consécutif :

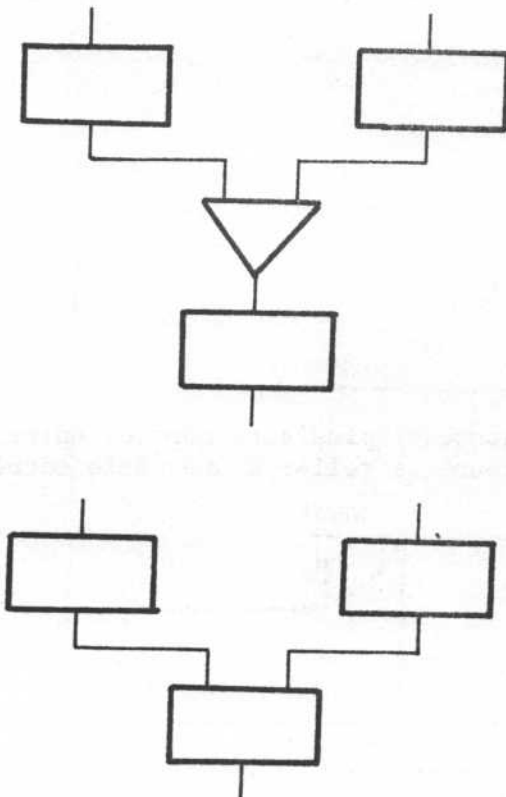


FIGURE 16

- descendante si une même sortie est distribuée à plusieurs entrées :

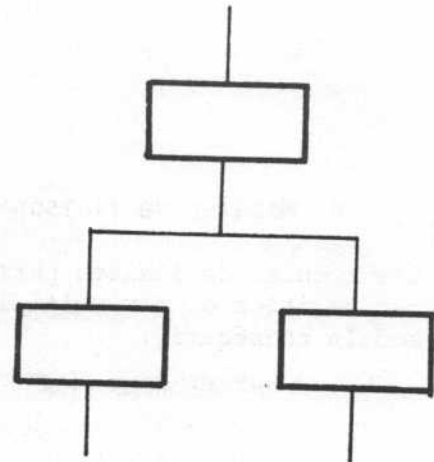


FIGURE 17

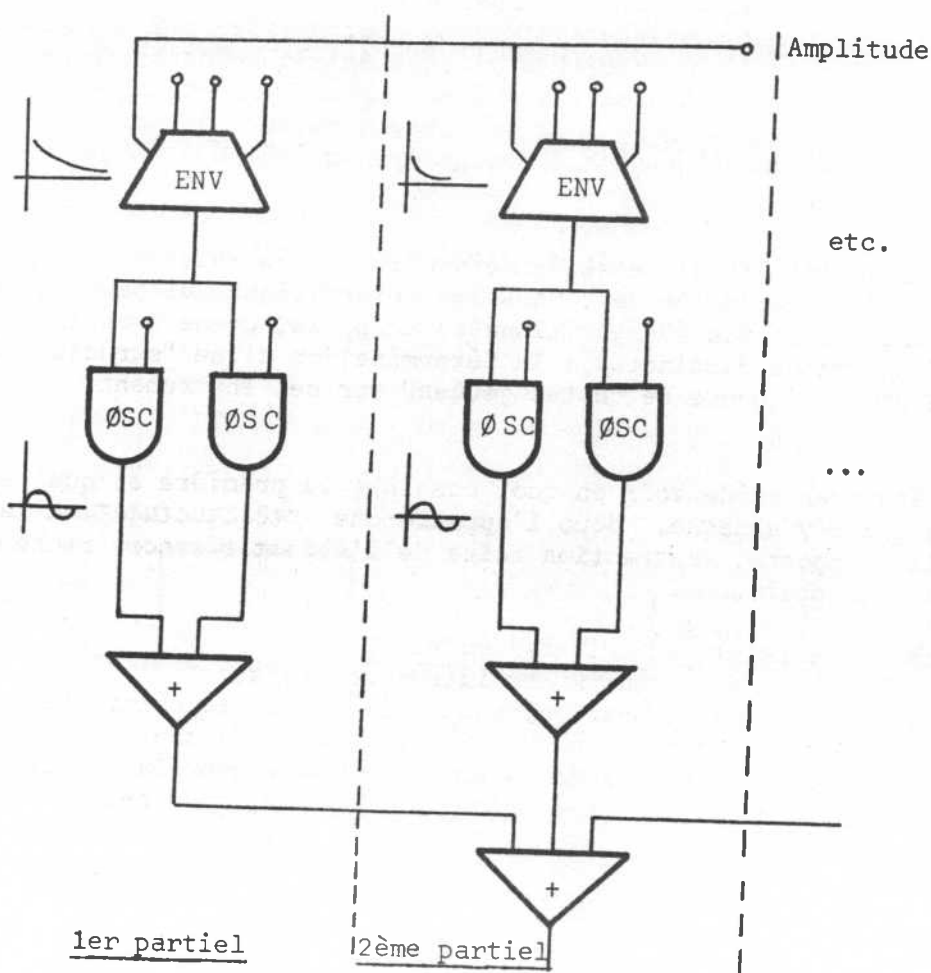
REMARQUES :

- . Il existe une hiérarchie dans la structure élaborée du fait que tous les signaux d'entrée d'un module donné doivent être disponibles (par blocs de 512 échantillons) avant que ce module puisse entrer en fonction.
- . Pour cette même raison, la connexion d'une sortie d'un module avec une entrée du même module n'est pas possible.
- . Nous n'avons pas fait apparaître la possibilité (qui est la plupart du temps une nécessité) d'effectuer des conversions d'échelle des signaux. Les signaux d'entrée sont de plusieurs types et n'évoluent pas dans les mêmes plages. On peut en effet distinguer par exemple les entrées acceptant un signal acoustique (entrée du filtre) essentiellement alternatif, et les entrées de contrôle de signe constant (contrôle d'amplitude de fréquence...). L'application d'un facteur d'échelle et d'un décalage permet d'envisager a priori n'importe quelle connexion entre sorties et entrées des divers modules, respectant toutefois l'ordre séquentiel.

La construction d'une "structure-instrument" consistera ainsi à combiner, par le jeu des connexions, différentes fonctions correspondant aux modules.

On pourra par exemple simuler le son d'une cloche en procédant de la manière suivante :

- Analyse des caractères acoustiques significatifs :
 - . composantes sinusoïdales (partiels) dans un rapport non harmonique,
 - . amortissement exponentiel différencié pour chacun des partiels (plus long pour les composantes graves),
 - . dédoublement de chaque partiel en composantes de fréquences voisines produisant un phénomène de battement lent.
- Construction du diagramme* définissant la structure :



* Le diagramme donné ici à titre d'exemple ne correspond pas à un dispositif optimal pour cette synthèse. Il n'a d'intérêt que pour l'explication. Nous reviendrons ultérieurement sur ce point.

Dans cet exemple simple, on s'est appuyé sur une utilisation "normale" des fonctions disponibles, c'est à dire issue directement des principes élémentaires. On peut remarquer simplement quel type de relation s'établit entre l'analyse initiale des caractères acoustiques déterminants du son de référence et le formalisme du système. Cependant, on conçoit également, dès ce niveau, que du formalisme même peuvent se dégager des directions d'investigation plus libres. Par exemple, il est permis dans le principe d'appliquer le signal du générateur d'enveloppe à l'entrée de fréquence de l'oscillateur ou même d'utiliser un autre oscillateur pour moduler cette fréquence. Dans certaines limites (fréquence et taux de modulation faibles), on retrouvera un phénomène simple et connu : le vibrato. Par contre, si l'on s'autorise une plage de variation plus grande pour ces paramètres, on obtiendra un nouveau phénomène. L'intérêt de la démarche devient alors singulier s'il se trouve que le processus sonore ainsi obtenu, sans référence initiale, se révèle signifiant pour l'oreille. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

1.1.2. Le mode opératoire

La définition d'une séquence sonore "exécutable" par le programme MUSIC V c'est à dire la donnée de toutes les informations qui permettront le calcul de l'onde de sortie (échantillonnée) s'appuie, comme nous l'avons déjà dit, sur deux phases distinctes : la détermination d'une "structure-instrument" et celle d'une séquence de "notes jouées" sur cet instrument.

Nous venons de voir en quoi consiste la première et quel est le formalisme qui s'y attache. Nous l'appellerons *préstructuration* et ajouterons qu'elle comporte, abstraction faite de l'objectif sonore recherché, trois niveaux de choix.

Les deux premiers : - choix des modules,
- choix des interconnexions,
conduisent à la configuration qualitative d'un dispositif laissant disponibles pour le contrôle un certain nombre d'entrées. Ce sont ces dernières qui seront précisément fixées dans la deuxième phase pour la définition des notes. Cependant, il n'est pas nécessaire de disposer, dans cette deuxième phase, d'une liberté de choix pour chaque note de toutes ces entrées. Certaines d'entre elles pourront alors rester constantes pour toutes les utilisations envisagées de l'instrument. C'est un troisième type de choix que l'on est donc amené à faire dans cette préstructuration. On pourra appeler celle-ci : *préstructuration quantitative* et celle correspondant aux deux premiers niveaux *préstructuration qualitative*.

DEFINITION DES NOTES

Dans une utilisation simple, les entrées de l'instrument pourront être des paramètres comme la fréquence (ou la hauteur) du son, son amplitude, sa durée, etc.

La définition d'une note porte alors sur ces paramètres, fixés pour cette note particulière.

A cela doivent s'ajouter deux autres informations :

- la note se singularise par l'instant précis où elle devra intervenir, sa "date d'occurrence" ("Action time"). Cette information doit donc être communiquée. Remarquons ici que MUSIC V est polyphonique. En effet, deux ou plusieurs notes de caractéristiques différentes pourront avoir la même date d'occurrence, une note pourra également être jouée avant que la précédente ne soit terminée.
- dans le même ordre d'idée, il est possible, dans la première phase, de définir simultanément plusieurs instruments distincts. La définition d'une note devra donc également comporter une indication relative à l'instrument sur lequel elle est jouée.

"PARTITION" POUR MUSIC V

Nous avons signalé plus haut, sans toutefois en indiquer les conséquences, que MUSIC V fonctionnait exclusivement en temps différé. La première conséquence est que son utilisation se partage en trois temps :

- . détermination des données définissant la séquence,
- . décodage par le programme, calcul des échantillons de sortie, stockage de ceux-ci dans une mémoire de masse,
- . lecture et conversion numérique/analogique à fréquence convenable pour l'écoute.

Le dispositif matériel comporte alors les éléments suivants :

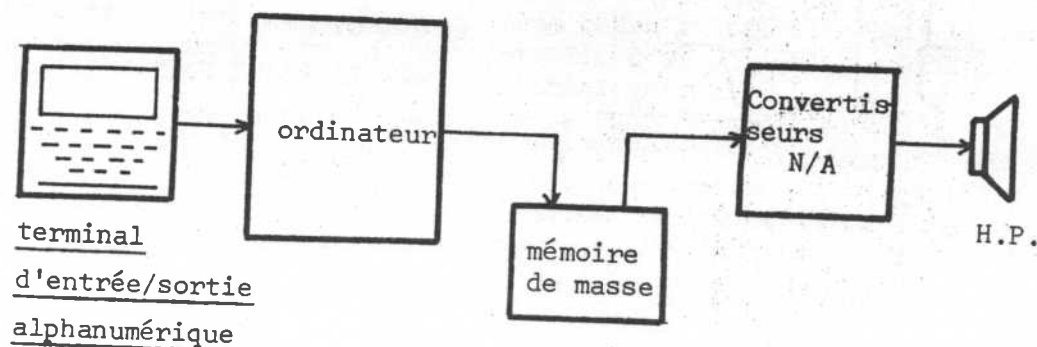


FIGURE 19

Au niveau de l'entrée des données, du fait du temps différé, il n'a pas été nécessaire, au départ, de faire appel à d'autres organes que le terminal utilitaire, au minimum nécessaire dans toute installation informatique : la console d'entrée/sortie alphanumérique. Les spécifications d'entrée passent donc par un codage alphanumérique intermédiaire. Ce codage porte ici le nom de "partition". Celle-ci se partagera donc en deux parties :

- * description des instruments,
- * description des notes.

1.1.2.1. LA DESCRIPTION DES INSTRUMENTS

La fonction du codage est d'établir une correspondance entre la description graphique de la structure-instrument sous la forme d'un diagramme bi-dimensionnel, et un énoncé linéaire et uni-dimensionnel sous la forme d'une succession de lignes d'instructions (constituées d'une suite de caractères alphanumériques).

Les problèmes posés ne sont pas élémentaires. Sur le plan purement informatique, le décodage de la partition fait en effet l'objet de toute la première partie ("Pass") du programme (qui en comporte trois au total). La difficulté réside dans le fait que ce passage d'un type de description à un autre doit être aisé pour un utilisateur non informaticien. La forme écrite finale définit en fait un langage qu'il devra pouvoir assimiler.

La description de la structure consiste en une suite de lignes-instructions, avec, pour séparer chaque définition d'instrument, une indication de début et de fin.

L'ensemble de ces instructions contient :

- l'énoncé des modules en cause,
- la référence aux tableaux correspondant aux fonctions ($F_n \dots$) nécessaires,
- les interconnexions entre modules,
- les paramètres fixes et les paramètres d'entrée à définir dans les notes.

Un exemple simple nous permettra d'être plus explicite :

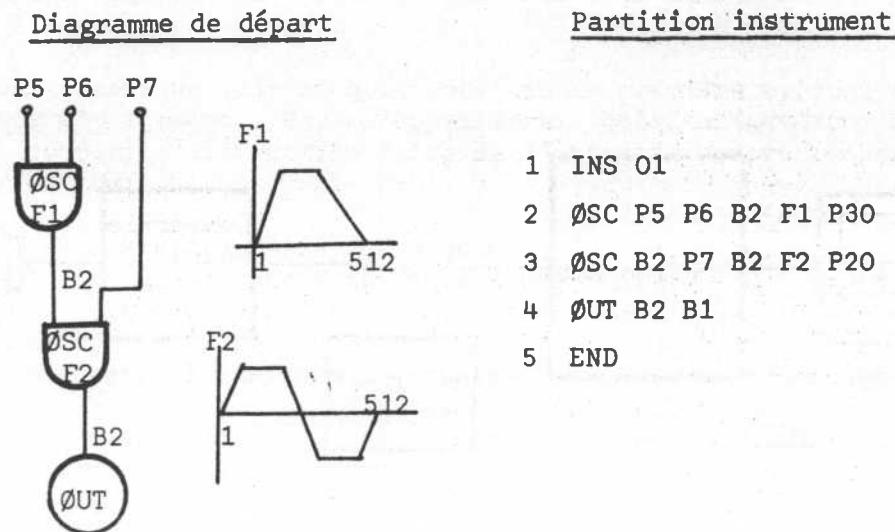


FIGURE 20

La ligne 1 et la ligne 5 sont des séparateurs.

Dans la ligne 1 apparaissent deux paramètres dont le rôle est défini, de même que pour les instructions suivantes, par le format même de l'instruction.

Le premier paramètre indique l'instant où l'instrument est nécessaire pour la première fois dans la séquence. Le deuxième est le numéro de l'instrument, qu'il faudra préciser dans chaque note.

La ligne 2 et la ligne 3 indiquent que deux oscillateurs distincts sont mis en oeuvre. Dans la liste des paramètres on distingue :

- les paramètres P dont la place dans la ligne indique qu'ils correspondent respectivement aux contrôles de l'amplitude et de la fréquence. L'usage de la lettre P suivie d'un chiffre renvoie aux paramètres intervenant dans les instructions de notes. Un paramètre repéré par la lettre V à la place de P aurait indiqué qu'il s'agissait non plus d'une variable mais d'une constante définie ultérieurement ;
- les paramètres B : dans l'instruction ØSC, le troisième paramètre définit la sortie de l'oscillateur. B indique ici que cette sortie est constituée par le "buffer" numéro 2 qui servira d'entrée d'amplitude à l'oscillateur de la ligne 3. Le rappel de la même lettre (suivie du même numéro) entre la ligne 2 et la ligne 3, de même qu'entre les lignes 3 et 4, est le moyen spécifique par lequel sont établies les connexions entre modules ;
- les paramètres F : le principe est le même. L'emplacement indique qu'il s'agit, pour l'oscillateur, de la référence au tableau qu'il utilisera. Le numéro est celui du tableau, défini ultérieurement, auquel il fera effectivement appel ;
- les paramètres P30 et P20 sont nécessaires en fin d'instruction. Ils renvoient à des "buffers" spéciaux dont le rôle n'a pas à être explicité pour la compréhension du langage.

1.1.2.2. DESCRIPTION DES NOTES

On retrouve ici un problème du même ordre puisqu'il s'agit également de donner une description unidimensionnelle d'un phénomène multidimensionnel, non plus cette fois dans le domaine spatial (graphique), mais temporel. Plusieurs événements sonores distincts peuvent en effet se superposer ou s'enchaîner. La partition traditionnelle résoud parfaitement ce problème en faisant appel, pour chaque portée, aux deux dimensions disponibles dans le graphisme plan. La suite des instructions d'un programme (d'une manière générale) a, de ce point de vue, la même caractéristique contraignante que l'écriture et la parole : ils se développent dans une dimension unique.

Cet aspect linéaire de la "partition de notes" de MUSIC V est l'un des caractères qui la rend en partie fastidieuse à la lecture, pour un musicien.

Pour en expliquer le principe, nous nous contenterons ici, de poursuivre l'exemple précédent en faisant jouer deux notes à l'instrument construit. (voir figure 21, page 22).

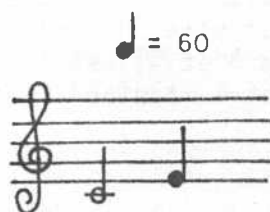
Les lignes 6 et 7 correspondent, avec les instructions GEN, à la donnée des points définissant respectivement le tableau F1 et le tableau F2 (cf. plus haut). Les deux premiers paramètres indiquent :

- . que les fonctions sont nécessaires à partir de l'instant 0,
 - . que l'on utilise un premier mode (n° 1) de génération pour ces fonctions.
- Le troisième paramètre est le numéro de la fonction.

La succession des valeurs, de la quatrième position jusqu'en "; " est une suite de couples de valeurs définissant les coordonnées des différents points de la fonction. Entre ces points sont effectuées des interpolations linéaires qui permettent de définir les 512 échantillons.

partition "traditionnelle"

partition de notes Music V



```

6 GEN 0 1 1 0 0 .99 20 .99 491 0 511 ;
7 GEN 0 1 2 0 0 .99 50 205 -.99 306 -.99 461 0 511 ;
8 NØT 0 1 2 1000 .0128 6.70 ;
9 NØT 2 1 1 1000 .0256 8.44 ;
10. TER 3 ;

```

FIGURE 21

Les lignes 8 et 9 correspondent aux deux notes.

On y distingue, après le code NØT, six zones que l'on peut identifier par les codes P2, P3... P7.

P2 est la date d'occurrence ;

P3 le numéro de l'instrument sur lequel la note est jouée ;

P4 la durée de la note ;

P5 a été défini, dans la partie instrument, comme entrée d'amplitude ;

P6 comme entrée de fréquence du premier oscillateur (qui définira la durée de la note) ;

P7 est l'entrée de fréquence du deuxième oscillateur.

La ligne 10 indique que la séquence se termine au bout de trois secondes.

1.1.2.3. REMARQUE SUR LA SEPARATION EN "INSTRUMENTS" ET "NOTES"

Dans cet exemple élémentaire, la distinction entre les deux phases semble tout à fait naturelle. La place des deux instructions GEN dans la partie "NOTe" n'est toutefois que partiellement justifiée puisque, par la donnée des fonctions F1 et F2, c'est une caractéristique propre au "timbre" de l'instrument que l'on détermine.

Dans des cas plus complexes, la séparation entre les deux notions peut sembler beaucoup plus arbitraire. Dans l'exemple du son de cloche, les notes jouées sur cet "instrument" seraient définies par leur instant d'occurrence et leur amplitude. En fait, pour évoquer les trois caractéristiques acoustiques mises en oeuvre ici, nous nous sommes servi des simulations effectuées par RISSET et décrites dans son catalogue [6]. Pour cet exemple précis, la partition, dans le catalogue est conçue d'une toute autre manière : l'instrument de base est très élémentaire :

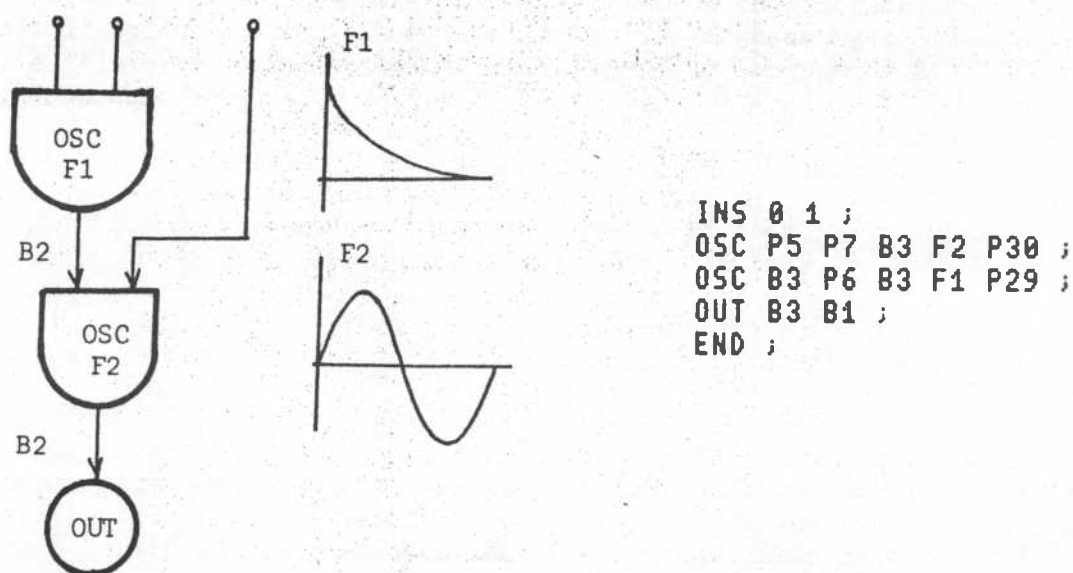


FIGURE 22

C'est dans la définition des notes que les caractéristiques sont déterminées, de la manière représentée sur la figure 23 (page 24).

Pour l'équivalent d'une seule percussion sont en fait nécessaires $2 \times n$ Notes (n étant le nombre de partiels), jouées simultanément avec des amplitudes, des fréquences, des temps d'amortissements différents.

A l'audition, l'ensemble est perçu comme un tout, les diverses notes se fondant en une note unique.

Inversement, on peut, à l'aide d'une seule note jouée sur un instrument particulier, donner à entendre un événement perçu comme une série de notes (voir figure 24, page 24).

Le générateur RAH produit une série de niveaux constants pendant la durée déterminée par I2. Ces niveaux appliqués à l'entrée de fréquence de l'oscillateur provoquent une succession de sons de durées égales, distincts par leur hauteur. On obtient ainsi une sorte de ligne mélodique comprise comme une succession de notes.

Dans d'autres cas plus complexes, par exemple pour les sons paradoxaux réalisés également par RISSET, l'étalement dans la durée et l'intérêt que l'on porte au phénomène particulier sur la hauteur, rendent caduque l'idée même de note.

-23-

NOT 1	1	20	150	224	20 ;
NOT 1	1	18	100	225	18 ;
NOT 1	1	13	150	368	13 ;
NOT 1	1	11	270	369.7	11 ;
NOT 1	1	6.5	400	476	6.5 ;
NOT 1	1	7	250	680	7 ;
NOT 1	1	5	220	800	5 ;
NOT 1	1	4	200	1096	4 ;
NOT 1	1	3	200	1200	3 ;
NOT 1	1	2	150	1504	2 ;
NOT 1	1	1.5	200	1628	1.5 ;
TER	22				;

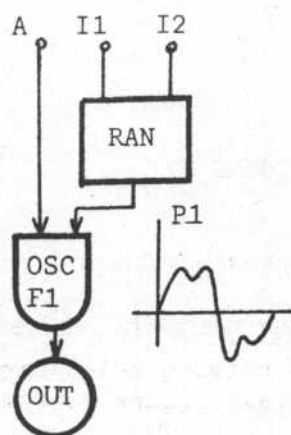


FIGURE 24

La dualité qui s'introduit alors est un des aspects féconds du système. Elle tend à orienter la construction du son et l'écoute d'une manière nouvelle. Cependant, la référence à ces concepts traditionnels, par l'usage même des termes "partition", "instrument", "note", demeure ici relativement ambiguë.

En effet, dans la notion de note, c'est l'unité perceptive qui est déterminante, mais est contenue, également, implicitement l'idée du jeu instrumental.

Dans la partition traditionnelle, il existe une correspondance assez étroite entre les unités sonores représentées par les notes et les interventions gestuelles dans le jeu de l'instrumentiste au moment de l'exécution. D'une certaine manière, la partition est une fixation du jeu, antérieure à celui-ci dans la composition, postérieure si elle a pour but de fixer des éléments joués spontanément, improvisés.

Dans le cas de MUSIC V, le principe de la synthèse directe d'une part, le temps différé d'autre part, impliquent une situation complètement différente. Il ne reste que l'acte compositionnel, à l'exclusion de l'exécution et du jeu. Jouer des notes est en fait, avec MUSIC V, une notion inexistante, ou alors il faudrait l'appliquer, mais c'est une limite inintéressante, au moment de l'écoute, à l'intervention provoquant le processus de lecture de la totalité de la séquence calculée.

Dans MUSIC V, il n'existe, en fait, qu'il s'agisse de l'"instrument" ou des "notes", qu'une seule et même phase de *préstructuration*. Faut-il la rattacher à la pratique du luthier et considérer que le tout est un instrument dont on ne peut jouer qu'une seule note, mais fort complexe, ou bien à celle du compositeur qui compose alors le son aussi bien dans sa microstructure que dans sa macrostructure ? Nous reviendrons plus loin sur cette question. Ce qu'il y a de certain est que l'instrumentiste est totalement absent.

Les quelques applications, parmi les plus significatives, que nous allons évoquer maintenant, apporteront un complément à cette présentation. Nous pourrions alors tenter de caractériser d'un point de vue plus général, la synthèse à partir de systèmes comme MUSIC V et ceux, plus récents, qui s'en déduisent.

1.1.3. MUSIC V - Expériences et réalisations

1.1.3.1. L'IMITATION DES SONS INSTRUMENTAUX

C'est une des premières applications de la synthèse directe, comme en témoignent les travaux de RISSET, MATHEWS, MORRIL, etc. Le catalogue de sons constitué par RISSET [6] contient un certain nombre d'exemples correspondant à ce propos : synthèse de sons de flûte, de gongs, de cloches, tambours, cuivres, etc. Plutôt qu'un but en soi, dont l'intérêt pourrait être discuté, la synthèse de sons instrumentaux connus apparaît comme une étape nécessaire de l'investigation.

L'obligation de traduire dans les termes d'un formalisme donné les caractères précis qui permettront d'identifier le son de référence apporte une compréhension nouvelle, à la fois des processus de perception et du son étudié. Nous l'avons vu à propos de l'exemple simple de la cloche.

Dans la synthèse des sons de trompette, RISSET montre par exemple "qu'un timbre est souvent caractérisé par une loi de variation, des corrélations spécifiques entre plusieurs paramètres, plutôt que par un spectre fixe ou quelque invariant du même ordre" [7].

Cependant, un autre intérêt apparaît lorsque, partant des points de repères ainsi constitués, on s'éloigne des références initiales par des cheminements directement déduits du formalisme utilisé. Entre deux simulations de sons instrumentaux distincts, on peut, par des modifications progressives de la structure et des paramètres, définir un parcours continu et réaliser ainsi une sorte "d'interpolation" entre deux timbres.

De même, partant d'un timbre donné, on pourra, par "extrapolation" le déplacer hors de ses limites. RISSET, dans sa pièce "Dialogue" et MORRILL dans ses "Etudes pour trompette et ordinateur" effectuent de telles extrapolations à partir de sons de trompette.

Par l'interpolation et l'extrapolation, s'opère une extension du champ sonore. La démarche est importante car, en même temps qu'une méthode pour la découverte de sons "inouïs", elle propose un moyen de les intégrer au champ sonore précédent. La pièce de RISSET réalise ceci par une confrontation entre des sons de synthèse enregistrés et des sons instrumentaux réels.

1.1.3.2. UN USAGE SPECIFIQUE : LA MODULATION DE FREQUENCE

Dans les expériences de CHOWNING [8], la démarche est différente. On abandonne ici la référence aux causalités instrumentales pour explorer plus systématiquement le donné du formalisme. On a pu évoquer, au départ, une utilisation "normale" de celui-ci, déduite directement des attitudes qui ont déterminé sa genèse. Cependant, en créant les fonctions de base à partir d'un outil général, on y introduit nécessairement des possibilités qui dépassent les objectifs de départ. L'exploration exhaustive de toutes ces possibilités devient alors un processus de recherche où le systématisme "banalisant" toutes les fonctions pour les aborder selon leurs aspects plus spécifiques peut être une méthode efficace.

La modulation de fréquence, avec un taux élevé et une fréquence de modulation proche de celle de la porteuse, se révèle comme un moyen de contrôler avec très peu de paramètres et une remarquable efficacité, des spectres complexes.

Partant d'une toute autre structure que RISSET mais, finalement, mettant parfaitement en application l'idée qu'un timbre est mieux caractérisé par une loi de variation que par des invariants, CHOWNING produit, par modulation de fréquence, des sons de trompette d'une remarquable qualité.

Le diagramme de l'instrument, valable pour de nombreuses autres applications est singulièrement simple (voir figure 25, page 27).

C'est en fait à partir de ce principe que MORRILL a poursuivi les travaux de RISSET sur la synthèse des sons "cuivrés".

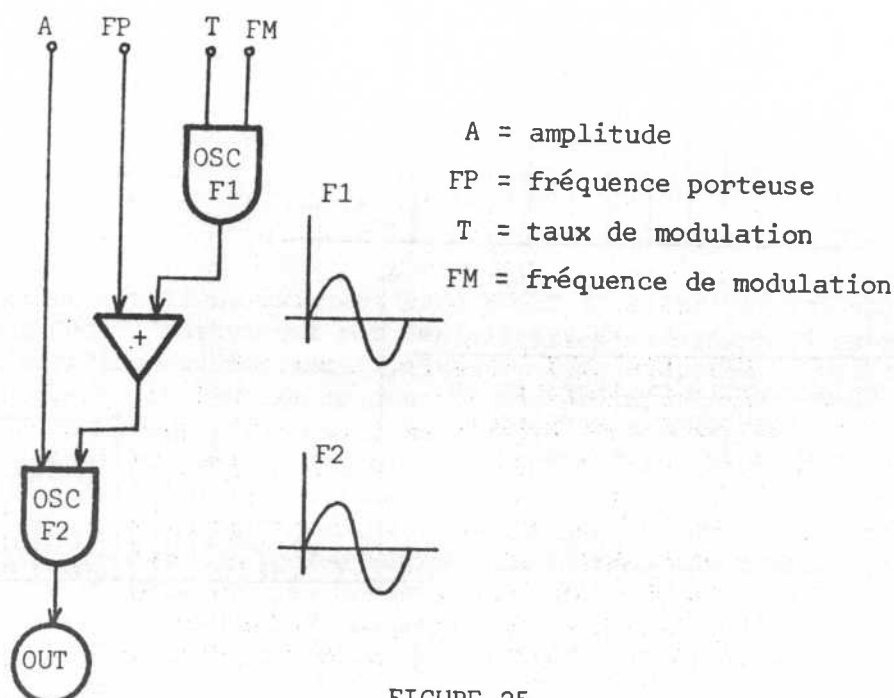


FIGURE 25

1.1.3.3. SONS PARADOXAUX - SONS INHARMONIQUES

Relevant plus directement de la psychoacoustique, d'autres expériences ont permis l'étude de certains phénomènes perceptifs, en référence, non plus à des causalités instrumentales, mais à des valeurs abstraites présentes dans le contexte instrumental traditionnel.

Les sons paradoxaux réalisés par SCHEPARD (1964) : - douze sons formant une gamme chromatique montant indéfiniment - puis généralisés par RISSET aux "glissandi sans fin" et sons "montant et descendant" simultanément..., ont permis de mettre en évidence l'aspect dual de notre perception des hauteurs : perception de la hauteur spectrale et perception de la hauteur tonale [9]. Dans le cas d'un son pur, plus simple pour l'explication, la première peut être reliée au nombre qui exprime sa fréquence. La seconde s'appuie sur la relation d'équivalence que l'oreille établit entre tous les sons à intervalle d'octave. La hauteur tonale est ce qui distingue deux éléments de la classe d'équivalence établie sur cette relation.

Le système de synthèse apporte ici la possibilité de rendre indépendants ces deux aspects, dans un même son, ce qu'aucun système mécanique ne permettait de faire (voir figure 26, page 28).

On peut évoquer, dans le même ordre d'idée, les études faites également par RISSET, sur les sons inharmoniques. Dans les sons "naturels", on peut distinguer entre autres, deux classes parmi les sons qui possèdent un spectre de raies discrètes. Dans la première se rangent les sons de cordes, de colonne d'air, de lames vibrantes... (sons périodiques, c'est à dire harmoniques) ; dans la seconde, sons de tôles, de surfaces, de volumes... Ces modes vibratoires ne possèdent pas une géométrie aussi simple et les rapports entre les différentes composantes peuvent être quelconques.

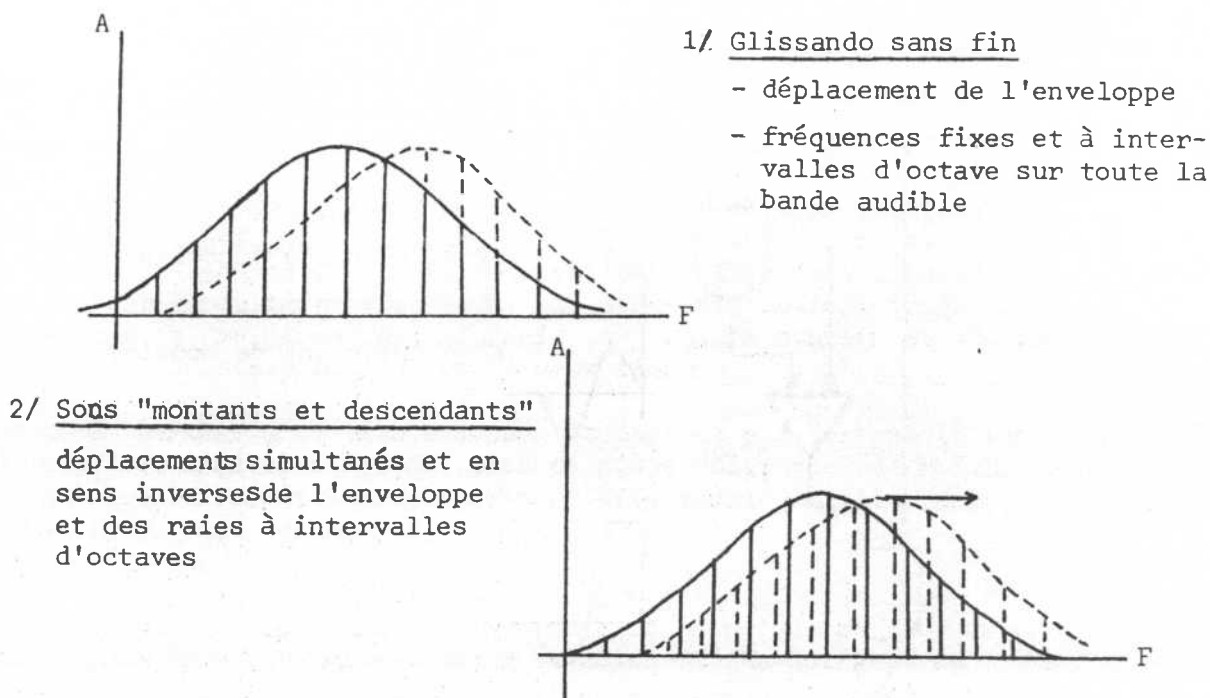


FIGURE 26

Il faut alors rappeler que la gamme occidentale s'est construite à partir des sons harmoniques : La consonnance entre deux sons peut être en effet reliée au nombre de composantes qu'ils ont en commun dans leur spectre. Ainsi, les intervalles fondamentaux (octave, quinte, tierce...) sont déduits des intervalles entre le fondamental et les premiers harmoniques, ramenés à l'octave, apparaissant dans le spectre d'un son "harmonique".

A partir de sons inharmoniques, de telles relations entre leur structure interne (ici spectrale) et leur rôle individuel dans une structure dont ils sont les éléments (une gamme, une mélodie...) n'ont pas pu se dégager en raison de la diversité des cas d'inharmonicité et de la difficulté de maintenir, dans un dispositif mécanique, une relation constante entre les partiels (lorsqu'on change, par modification mécanique, la hauteur tonale du son).

Par synthèse, il est possible de produire des sons perçus de manière tonique mais constitués de composantes inharmoniques dans des rapports précis et reproductibles quelle que soit la hauteur spectrale. La consonnance entre plusieurs sons produits de cette manière apparaîtra pour des intervalles différents de l'octave, de la quinte...

C'est une direction d'exploration compositionnelle qui s'ouvre alors ici et qu'illustre la pièce "Inharmoniques" de RISSET.

Ces deux exemples montrent un autre apport de la synthèse. Lié à la nature du formalisme qui induit de telles directions d'investigation, il est plus important ici, par la précision de la représentation et du contrôle des phénomènes. Des dispositifs mécaniques n'auraient pas permis la mise en oeuvre de telles expériences.

De fait, dans le contexte des instruments traditionnels, l'oreille ne pouvait être amenée à s'intéresser à de telles particularités microstructurelles. La synthèse permet ici une extension du champ perceptif complémentaire de la précédente.

1.1.3.4. AU NIVEAU MACROSTRUCTUREL

Nous ne nous sommes intéressés, dans les exemples précédents, qu'à l'aspect microstructurel du son. Dans le dernier exemple, l'aspect macrostructurel est déjà en partie évoqué ; cependant, les règles d'organisation macrostructurelle sont déduites de la microstructure et ne font pas, à proprement parler appel à des "fonctions compositionnelles" inhérentes au formalisme de MUSIC V (du moins pour ce qui concerne l'étude particulière de l'inharmonicité).

Or, de telles fonctions existent dans MUSIC V, elles peuvent apparaître directement dans l'instrument par le fait que des signaux de contrôle très lents, discontinus ou continus, peuvent y être élaborés. Mais elles peuvent l'être aussi par l'usage de sous-routines particulières. Nous ne les avons pas introduites ici, pour limiter cette présentation. Elles peuvent être considérées comme des "Macros Instruments" en ce sens qu'elles permettent le contrôle par des paramètres globaux de séquences de notes prédéterminées. Ainsi, on pourra, partant d'une ligne mélodique, effectuer des transformations comme la transposition, la contraction fréquentielle, la contraction ou l'étalement des durées, etc. MATHEWS a ainsi développé des "algorithmes compositionnels" permettant de réaliser des transitions entre deux thèmes, des transformations progressives de rythmes, etc.

On retrouve, transposé au niveau macrostructurel, un processus analogue, sur le plan du principe, aux interpolations et extrapolations de timbres.

Cette liste rapide de quelques-unes parmi un grand nombre d'applications de MUSIC V, montre cependant que ce système apparaît comme un outil fondamental d'où se dégage une certaine unité de principe, quel que soit le niveau où l'on aborde le sonore.

Ce que nous avons tenté de mettre en évidence, au travers de cette présentation, plus que les caractères spécifiques à chaque utilisation du système, est une problématique générale. La synthèse sonore à l'aide de l'ordinateur, met en présence deux pôles : une référence, ou l'objet de référence (ici l'espace sonore) et un moyen technique, ici l'ordinateur. Le moyen se particularise, au travers de liens initiaux avec l'objet de référence, en un système caractérisé par son formalisme. Celui-ci permet alors ce que l'on a appelé jusque là la synthèse d'objets appartenant à cet espace initial. Cette synthèse est une manière de présenter sous un autre aspect et dans d'autres conditions l'objet initial. C'est en fait une *représentation* de cet objet. Deux aspects de l'expérience permettent effectivement de l'envisager selon cette fonction très générale : d'une part l'investigation faite sur l'aptitude du système à "représenter", au travers des essais d'imitation de sons instrumentaux ou simplement de sons connus. Par cette représentation, c'est une nouvelle connaissance de ceux-ci que l'on acquiert. D'autre part, l'autonomie du système, la liberté qu'il conserve par rapport au domaine de référence. Ce deuxième point est fondamental car de là naissent des possibilités authentiquement nouvelles de création.

Il nous semble alors intéressant d'attribuer à l'ordinateur ce rôle très général de "moyen de représentation" et d'envisager une autre direction dans laquelle il pourra, restant toutefois dans le domaine musical, le remplir.

Avant d'introduire les éléments propres à notre démarche, dans ce sens, nous consacrerons quelques lignes au processus de représentation en général.

1.2. LA REPRESENTATION*

TROIS CARACTERISTIQUES DE LA REPRESENTATION

Faire appel à un substitut pour évoquer, donner à l'expérience perceptive les aspects d'un objet que l'on tient, pendant le temps de cette expérience, pour réel, est typiquement une attitude de "représentation". Nous nous servirons ici, pour introduire cette idée très générale, des propos de PAULUS dans l'introduction de son ouvrage "La fonction symbolique et le langage" [10] :

" A la différence de l'animal, l'homme peut évoquer les objets absents, éloignés dans le temps et dans l'espace, par l'intermédiaire de substituts divers : portraits, schémas, symboles, signes, termes du langage, images mentales, concepts. Le portrait représente la personne (...), la carte géographique le pays (...). Connaître, sous son aspect le plus général, n'est rien d'autre que se représenter (...). A ces substituts, comme parfois aussi aux choses réelles, l'homme applique des conduites d'un type spécial : symboliques, verbales ou mentales, plus économiques et plus praticables, quoi que non moins gratifiantes que les actions motrices dont elles tiennent lieu (...). On lacère un portrait faute de pouvoir mettre à mal la personne haïe, on étudie un itinéraire sur la carte, on raisonne, c'est à dire qu'on remplace l'expérimentation effective sur les objets par l'expérimentation verbale ou mentale sur les signes..."

Un des aspects essentiels, comme l'indique ensuite PAULUS, réside, qu'il s'agisse des images ou des substituts en général, dans leur caractère "d'entités à double face", associant un élément "représentant" et un élément "représenté".

Dans ces quelques lignes sont exprimés les aspects fondamentaux du processus de représentation :

- La mise en correspondance de "deux faces", en fait de deux objets (au sens large) procédants de deux systèmes différents, par exemple l'ensemble des objets à trois dimensions et l'ensemble des objets visuels plans obtenus avec un système "pictural" quelconque : toile / peinture / pinceaux, feuille / crayon, système de visualisation sur écran cathodique, etc.
- La nature de cette correspondance et son intérêt :
L'intérêt réside a priori dans la possibilité de "remplacer l'expérimentation effective sur les objets (initiaux) par une expérimentation sur les signes (ou objets représentants)". La nature de la liaison entre les uns et les autres est alors déterminante. On peut distinguer schématiquement plusieurs cas. Elle peut être symbolique. Il existera alors un lien "naturel" entre l'objet représenté et ce qui le représente : l'agencement des contours, des couleurs, des contrastes sur un portrait correspond à l'agencement des mêmes éléments perceptifs sur l'objet initial (le personnage).

* NOTE : Le sujet même de notre travail implique des considérations qui s'éloignent de préoccupations purement techniques. Il nous a semblé nécessaire, pour tenter de poser clairement les hypothèses de notre démarche, d'intégrer ici ce chapitre, malgré le caractère particulier de son contenu.

Elle peut être, à l'opposé, arbitraire, c'est à dire sans liens immédiatement observables. La représentation des mots de la langue par des signes graphiques (les lettres), suppose en effet un apprentissage préalable de la liaison entre chaque élément graphique et chaque élément vocal.

Dans ces deux cas (et dans le cas général), que le lien soit direct ou suppose un codage intermédiaire, il existe une relation informationnelle entre les deux objets : une information est commune aux deux.

Alors, plus que la possibilité d'évoquer l'objet en son absence, comme l'indique PAULUS, le substitut permet de l'évoquer d'une manière "plus économique".

"Evoquer" signifie en fait établir une relation expérimentale avec le "substitut" passant par un échange dont la première mesure est énergétique. La première condition que doit remplir ce dernier est alors d'impliquer dans cet échange une dépense énergétique moindre, d'être, autant dans la durée que dans l'espace, un objet "moins encombrant" que celui qu'il représente.

La conséquence immédiate de cette réduction énergétique est alors, nécessairement, une réduction informationnelle. C'est simple à constater dans l'exemple du portrait : il n'évoque qu'une partie des formes en volume (par le jeu des ombres), il ne peut retraduire des mouvements particuliers de la physiologie par exemple, enfin il n'est pas la personne avec ses facultés d'agir, de parler...

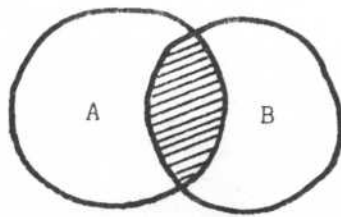
Le processus de représentation établit, en même temps qu'une correspondance informationnelle, une réduction entre l'objet représenté et le signe qui le représente. Il extrait de l'objet initial, dont l'entité totale reste inaccessible, une partie, un sous-ensemble de l'information qu'il contient.

Nous avons mentionné plus haut que les "deux faces" mises en relation procédaient de deux systèmes différents. L'identification d'un système n'est pas très aisée lorsqu'il s'agit de l'objet représenté. Pour l'objet représentant, elle peut être beaucoup plus précise. Il s'agit en premier lieu du moyen pour sa production. Dans le cas de la peinture par exemple, il est déterminé par des éléments matériels : la toile, la peinture, les pinceaux, etc. Le rapport entre ces différents éléments n'est pas quelconque. La consistance de la peinture et la granulation de la toile, la grosseur ou la souplesse du pinceau, la manière dont deux couleurs fondamentales se combinent pour produire une troisième couleur, ... sont autant de données indépendantes au départ de ce que l'on se propose de peindre. Sur l'étude seule de ces données peut s'ériger un système.

Nous avons rencontré, d'une manière identique, cet aspect, dans les contraintes algorithmiques ou liées au "langage machine" de l'ordinateur dans le problème de la synthèse.

Il faut alors introduire une troisième caractérisation de cette relation : Le système de représentation lui-même peut ajouter à l'information extraite de l'objet de référence, une information supplémentaire qui n'appartient pas à ce dernier. A la réduction s'ajoute une "interprétation".

On peut représenter les deux derniers aspects par le schéma de la figure 27.



A = objet de référence

B = système de représentation

$A \cap B$ = réduction de l'objet représenté

$B - A \cap B$ = apport propre au système

FIGURE 27.

D'une certaine manière, l'objet représentant est également et inévitablement représentant du système qui permet de le produire.

Cette dernière remarque revêt une certaine importance du fait que lors du rapport perceptif au signe, on n'est pas nécessairement en mesure de faire la part entre les deux participations.

DEUX ATTITUDES OPPOSEES, DANS LA REPRESENTATION

Le dessin technique est un processus de représentation. Il permet la conception d'une pièce mécanique aux formes et aux fonctions complexes grâce à un ensemble de relations rigoureuses entre les volumes, les surfaces et un système de lignes dans le plan et de conventions de notations. L'intérêt de cette représentation est évident : par le recours simultané au "crayon et à la gomme", on peut de manière réversible et économique construire et "déconstruire" la pièce jusqu'à l'obtention de sa forme fonctionnelle définitive. Mais ici, la rigueur des relations est primordiale car elle autorise, objectif de l'opération, le retour inverse, dans la réalisation effective de la pièce, du représentant au représenté. On pourrait presque dire alors que la pièce réalisée représente le dessin. De nombreux cas de représentation doivent répondre à cette nécessité.

Par le dessin en perspective, on pourrait réaliser la même fonction, cependant, celui-ci est plutôt reconnu comme appartenant au domaine des arts graphiques.

Il faut dire que la perspective peut en effet nous jouer des tours difficiles. On aurait beaucoup de mal, par exemple, à réaliser concrètement la pièce représentée par le dessin 28 ou à trouver l'équivalent réel du dessin 29 (voir page 34).

Ces exemples sont extrêmes mais ils montrent qu'une logique suivie au niveau du système de représentation même peut interdire le retour à l'espace de référence et lui échapper complètement*.

* RISSET associe parfois la deuxième figure due à PENROSE aux "Glissandi sans fin". L'image montre bien le pouvoir de la synthèse qui, par sa fonction de représentation permet de tels paradoxes. Le paradoxe n'est cependant pas du même ordre dans les deux cas : dans le cas du dessin de PENROSE, il est généré par l'ambiguïté due à la suppression d'une des trois dimensions de l'espace dans sa représentation plane. Dans le cas des glissandi sans fin, il apparaît grâce aux performances du système qui autorisent le dédoublement en deux dimensions objectives, d'un caractère qui semblait unidimensionnel faute de moyens expérimentaux.

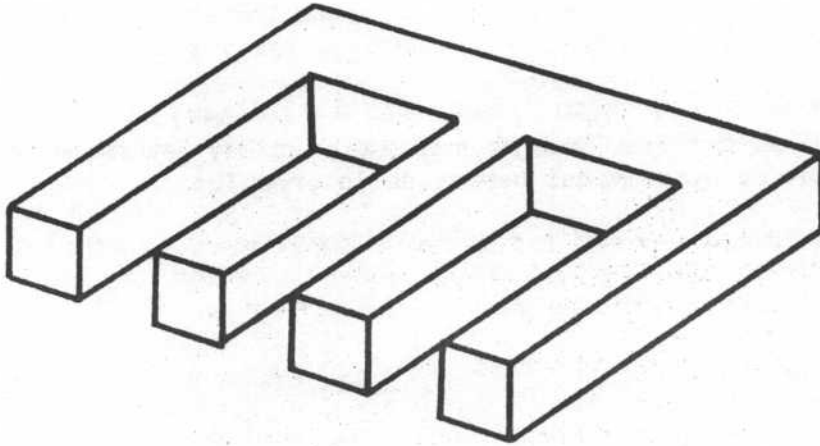


FIGURE 28

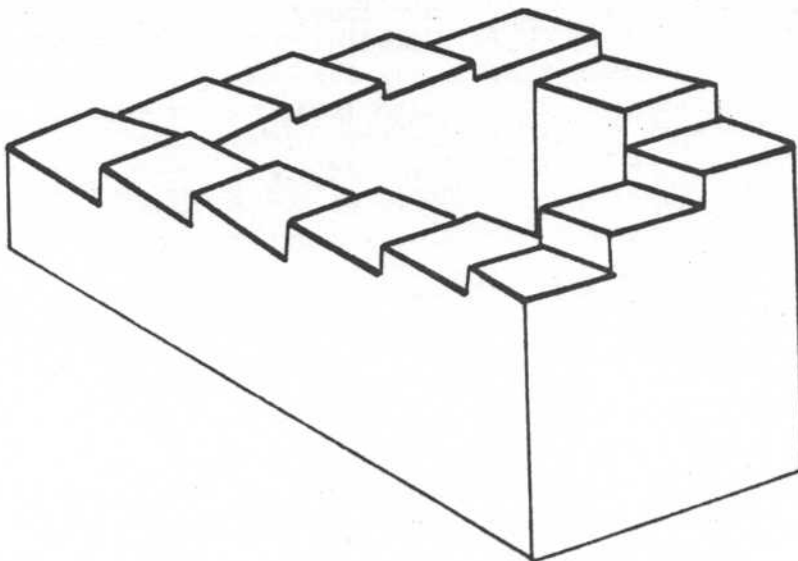


FIGURE 29

L'identification de cette référence, en d'autres termes du signifié, peut être un des objectifs d'une sémiologie de la musique mais n'apparaît pas comme une condition préalable à la création. Celle-ci tend à se situer au niveau du signe manipulé précisément grâce à un système qui conserve une autonomie par rapport au signifié.

On peut à nouveau évoquer des propos cités par PAULUS (op. cit. page 32) et empruntés à WALLON :

"Les illusions du jeu chez l'enfant ont pour contrepartie exacte le sentiment et le désir continu de la fiction (...). S'il présente un bout de papier comme un mets succulent, l'écart même des deux objets est un stimulant de son plaisir. Ses jouets préférés sont surtout les plus informes, ceux par lesquels les conditions du réel cessent de le dominer aux dépens de ses velléités imaginatives". (H. WALLON "La vie mentale" T.III, Encyclopédie Française. Paris, 1938).

Une fois admise la distanciation par le processus de représentation, représenter un objet qui n'existe pas est, pour l'artiste, un acte de création. Le sentiment esthétique tire alors une part de sa substance des règles et des systèmes que s'impose le créateur et de la conscience de cette "distance de représentation". On conçoit qu'il faille porter une attention particulière d'une manière générale au système de représentation.

1.3. LA REPRESENTATION AVEC MUSIC V

Partant de MUSIC V comme système de base, nous avons introduit l'idée que l'ordinateur pouvait être considéré, dans cette application, comme un moyen de représentation.

A la lumière des quelques notions que nous venons d'évoquer, nous allons tenter de caractériser le processus de représentation auquel correspond la synthèse fondée sur ces principes.

C'est enfin, sur une manière différente d'envisager ce rôle de représentation que nous nous appuierons pour définir quelques aspects de notre démarche propre.

On peut, en premier lieu, caractériser la synthèse directe comme une représentation du son, plus exactement une "représentation sonore" du son. En effet, l'ensemble des dispositifs et des différents aspects de la pratique convergent vers un point de diffusion de l'objet : le haut-parleur (ou l'ensemble de haut-parleurs).

On peut établir, à plusieurs titres, pour expliciter cette fonction de représentation, une analogie entre ce moyen de diffusion et, dans le domaine visuel, le plan rectangulaire du tableau, de l'écran ... : la localisation en un lieu précis d'exposition, la réduction de l'espace réel à trois dimensions en un plan (dans le cas où l'on utilise deux haut-parleurs, plan vertical les contenant), la restitution de l'espace réel par des artifices : la perspective dans le cas de la représentation visuelle - qui est une représentation visuelle d'objets visuels - , la réverbération artificielle et l'effet stéréophonique dans le cas du son.

Mais ceci ne constitue qu'une première approche, applicable à tout dispositif électroacoustique comportant en bout de chaîne un système de diffusion par haut-parleurs : disque, bande magnétique, radiodiffusion, synthèse analogique et numérique, etc.

La particularité de la représentation sonore dans la synthèse apparaît, en fait, dans le rapport singulier entre l'opérateur et le résultat sonore.

Le mode opératoire relatif à MUSIC V faisait apparaître deux phases : construction de l'instrument et détermination d'une séquence de notes. L'ordinateur, chargé par MUSIC V, est-il alors assimilable, en tant que système, à un instrument ou à un "système de composition" ? Le retour à une observation des situations traditionnelles permet d'introduire des éléments de distinction.

Dans la pratique musicale traditionnelle, on peut distinguer deux situations complémentaires : celle de l'instrumentiste et celle du compositeur. Nous prenons la première dans un sens général où l'instrumentiste n'est pas exclusivement exécutant, mais expérimentateur d'un dispositif qui s'interpose entre ses gestes et son écoute.

L'EXPERIMENTATION INSTRUMENTALE

C'est le son lui-même qui remplit directement la fonction de signe ; l'instrument en est le moyen de production. Celui-ci se caractérise ici d'une part par le fait qu'il est un objet concret, perçu par l'ensemble des canaux sensoriels, d'autre part par le fait que l'investissement actif de l'instrumentiste et le résultat sonore sont simultanés.

LA SITUATION DU COMPOSITEUR

Précisons d'abord les limites de son domaine, en posant comme objet de sa production, la partition elle-même, l'interprétation ou l'exécution de celle-ci relevant de l'instrumentiste ou de l'ensemble instrumental. La partition est une "représentation visuelle" du son (et plus largement de l'activité instrumentale en donnant parfois des indications relatives au mode opératoire). Dans le cas limite, où l'exécution ne laisse pas de place à l'interprétation, la représentation est stricte et permet, condition nécessaire, le retour au "représenté".

Ainsi, et dans la mesure où les deux situations, celle de l'instrumentiste et celle du compositeur, sont corrélées, la partition joue le rôle de représentation propre du son, mais indirectement, au second degré, par l'intermédiaire de signes graphiques.

En tant que moyen de représentation, elle est constituée d'une part par les codes, abstraits et conventionnels, de la notation musicale, d'autre part par l'ensemble des règles compositionnelles acquises expérimentalement et culturellement : objectivation de formes et d'articulations dépassant l'expérimentation instrumentale spontanée.

Dans le cas de la synthèse, il y a de même une première distanciation établie par le fait que le son est représenté, qu'il n'y a pas de sources naturelles.

Par la "représentation sonore" des sons (par les haut-parleurs), de la situation traditionnelle à la synthèse directe, un "maillon" de la chaîne est supprimé : celui de l'exécution et le musicien peut considérer qu'il obtient directement l'objet sous sa forme diffusable.

Cette exécution peut cependant être attribuée à l'ordinateur, qui effectue automatiquement et rigoureusement, la traduction sonore d'un produit initial, la "partition" au sens de MUSIC V.

Ainsi, celle-ci peut être considérée comme "représentation écrite" du son et, dans la mesure où sa traduction sonore est rigoureuse, c'est dans sa production que se situe l'essentiel de la démarche.

Il ne peut plus être question, ici, de représentation de jeu instrumental puisque, comme nous l'avons montré plus haut, l'instrument et l'étape d'expérimentation instrumentale n'existent pas. Les deux phases de la partition sont les deux aspects complémentaires d'une représentation de la structure sonore, contenant d'une part un système objectif pour représenter le son dans sa microstructure -dont le compositeur traditionnel ne disposait pas- d'autre part un système compositionnel également objectif remplaçant des systèmes auparavant idéels.

L'attitude, dans cette démarche, est donc une attitude de compositeur, même si elle inclut une part de ce qui revenait antérieurement au luthier.

Des trois pratiques musicales : du luthier, de l'instrumentiste et du compositeur, ne subsiste que la dernière.

Il nous semble alors, mais ceci ne peut être formulé que comme une hypothèse, que l'expérience instrumentale (au sens quasiment primitif) est une condition première à la faculté d'expression musicale. En effet, bien que, dans le contexte actuel, bon nombre de compositeurs n'aient aucune approche de cet ordre de la plupart des instruments qu'ils mettent en œuvre dans leur composition, il ne faut pas oublier qu'ils ont reçu, par de multiples canaux, aussi bien dans leur formation générale que dans les expériences simples et quotidiennes, un ensemble d'informations incluant cette expérimentation instrumentale. Ces dernières ne portant pas seulement sur l'aspect

sonore, mais aussi sur les processus physiques et mécaniques en cause. Aussi, l'observation d'un instrumentiste en action est déjà un moyen de connaître l'objet global qu'il manipule. Cette observation est par ailleurs confortée par l'expérience triviale que tout un chacun peut avoir, au niveau gestuel, visuel, etc. de corps vibrants simples : une corde, une lame ou des résonateurs naturels. C'est donc d'une expérience instrumentale globale dont nous sommes nourris et qui nous fournit des points de repères fondamentaux face à une pratique des instruments mécaniques.

Pour cela, même si l'évènement sonore acquiert, après une longue pratique, une certaine autonomie en tant que signe, il reste en partie signifiant de ces références causales.

Avec la synthèse qui met en oeuvre, dès le niveau élémentaire, des processus abstraits, c'est cette expérience primaire qui fait défaut. L'extension du signe sonore ne peut alors se faire, comme dans l'interpolation et l'extrapolation des timbres, que par référence à des causalités instrumentales antérieures et non sur une expérimentation de type instrumental des processus propres au nouveau moyen employé.

A ce titre, peut apparaître à terme une limitation de cette extension, disproportionnée par rapport au potentiel propre à l'outil utilisé.

Cette hypothèse nous conduit à envisager l'utilisation de l'ordinateur non plus pour représenter le son, mais dans une représentation de ce qui le produit, l'instrument, incluant tous les aspects expérimentaux qui s'y attachent.

REMARQUES SUR QUELQUES SYSTEMES DERIVES DES PRINCIPES DE MUSIC V

Nous avons attaché une certaine importance, ici, au système MUSIC V en raison des bases générales qu'il a posées. D'autres systèmes, bien sûr, depuis sa mise au point et ses premières applications, ont été élaborés. Plusieurs préoccupations déterminent alors les directions de leur développement, parmi lesquelles on peut relever :

- le perfectionnement du langage d'utilisation,
- l'approche du temps réel,
- la question des "accès".

Le langage MUSIC V tel qu'il se concrétise dans la forme de la "partition" apparaît, pour le compositeur, comme trop directement lié aux langages de programmation, et requiert de sa part une attitude d'esprit à laquelle il n'est pas toujours préparé. L'apprentissage nécessaire peut alors l'éloigner de préoccupations purement musicales. Le programme SCORE conçu par Leland SMITH [11] permet de communiquer les données selon un langage plus proche de celui du musicien. On peut citer aussi les travaux de X. RODET à l'IRCAM, à propos de la synthèse de la parole, mais aussi dans leur extension à la synthèse musicale. Une des caractéristiques de la démarche consiste ici à tenter de supprimer, dans l'écriture de la "partition", les deux phases relatives à l'instrument et aux notes, pour les intégrer dans un type unique d'instructions décrivant à chaque instant ce qui procède de la structure génératrice et ce qui procède des paramètres déterminant les signaux.

Cette dernière démarche semble en effet plus cohérente dans la mesure où, comme nous l'avons remarqué, en raison du temps différé, seule la notion de prédétermination peut être appliquée, à l'exclusion du jeu. Ces deux exemples, conservant les principes de base de la synthèse dans MUSIC V, font prévaloir l'aspect exclusivement compositionnel attaché à la nature initiale de ce système.

Le développement des circuits (intégration à grande échelle) a permis, grâce à la rapidité et la plus grande complexité des fonctions, d'aborder de manière conséquente le problème du temps réel.

Depuis plusieurs années, divers systèmes de synthèse digitale en temps réel ont été étudiés et construits. On peut citer entre autres la série des machines construites par DI GIUGNO à l'IRCAM [12], le synthétiseur "Synclavier" de ALONSO et JONES, construit à Norwich (U.S.A.).

Le synthétiseur de DI GIUGNO permet la mise en oeuvre simultanée et en temps réel d'un grand nombre d'oscillateurs (jusqu'à 256 dans la première version). Le principe de ces oscillateurs reste identique à celui de l'oscillateur de MUSIC V et s'appuie sur une tabulation.

Dans le système de ALONSO et JONES, sont également mis en oeuvre des oscillateurs numériques du même type. Cependant, l'appareil est conçu d'emblée avec un environnement spécialisé pour la commande et le contrôle : console de contrôle de la structure et des paramètres (que l'on pourrait appeler console de préstructuration qualitative et quantitative), clavier chromatique, télétype, platines de disques magnétiques souples... Par cette présentation, l'appareil pourrait être véritablement considéré comme un "instrument".

En fait, dès que le cap du temps réel a été franchi, un problème, que MUSIC V ne pouvait poser, est apparu : celui des "accès".

Ce terme a un sens assez large. Dans le cadre des travaux sur MUSIC V, de l'équipe d'informatique du G.R.M. - I.N.A. (Groupe de Recherche Musicale de l'Institut National d'Audiovisuel - P.A. JAFFRENOU, B. MAILLARD,...) [13], le terme est appliqué aux différentes entrées laissées disponibles pour définir chaque note par la détermination de la structure. Nous lui donnerons ici un sens plus précis et plus limitatif en l'employant à propos des entrées, du même type, mais dont la modulation peut être effectuée en temps réel avec une incidence directe et simultanée sur le résultat sonore.

Parmi les différentes approches de ce problème, on peut citer celle de MATHEWS avec le système GROOVE [14]. Les paramètres d'accès sont ici abordés et traités d'emblée en fonction d'une signification donnée. Les gestes de l'opérateur s'appliquent à divers dispositifs : clavier, "manche à balai", boutons de potentiomètres. Ce sont alors les "fonctions gestuelles" qui sont prises en compte - jeu des doigts sur le clavier, mouvements de la main sur le "manche à balai" - et considérées comme données enregistrées, restituées, modifiées. MATHEWS assimile l'ensemble des comportements à celui d'un chef d'orchestre qui intervient en temps réel sur des caractères globaux de la structure sonore : amplitude relative de chaque instrument, amplitude globale, tempo, etc. Par ailleurs, la constitution successive, par ce moyen, de diverses voies intervenant dans une structure, peut être considérée comme un jeu instrumental.

Dans le cas de la machine de DI GIUGNO, le problème est moins simple. En effet, la combinaison des oscillateurs en structures complexes offre à l'opérateur un grand nombre de paramètres d'entrée à gérer simultanément sans autre recours que la référence à leur rôle purement acoustique. L'aspect abstrait, lié au formalisme de base, comme dans MUSIC V, est un obstacle à l'assimilation du contrôle des paramètres d'entrée à un jeu instrumental.

Le temps réel, dans ces divers systèmes, est extrêmement gratifiant pour le compositeur, dans la mesure où le temps qui sépare la conception et la perception du produit, est réduit à l'extrême. Cependant, la question des "accès" nous semble ici posée comme un faux problème dans la mesure où elle fait abstraction au départ de la "fonction gestuelle". Celle-ci, dans la pratique du compositeur, est secondaire. Dans le cadre, cependant, de dispositifs capables, comme c'est le cas des systèmes numériques et informatiques, d'élargir dans une très large mesure les possibilités sonores, c'est, nous semble-t-il, par un retour aux conditions de l'expérience instrumentale élémentaire qu'il faut aborder cet aspect. Dans cette dernière, le geste est directement lié à l'écoute et ce lien est fondamental dans les premières phases d'investigation. Le geste participe à la connaissance que l'expérimentateur acquiert de la structure qu'il manipule.

Nous limiterons ici ce rapide tour d'horizon. Une analyse de bon nombre d'autres expériences serait intéressante. C'est le cas, par exemple, toujours dans le cadre d'une attitude et de préoccupations de compositeur, de celle de WESSEL à l'IRCAM : donnant comme représentation sonore une sorte de carte de timbres [15] sur laquelle l'opérateur peut effectuer des trajets particuliers.

Dans la démarche que nous présenterons maintenant, avant de nous attacher à l'élément sonore en tant que signe, c'est, plus globalement à la structure objective qui le produit que nous nous intéresserons, dans la perspective de situer la fonction symbolique à son niveau même. Ceci implique, comme on le verra, un certain nombre de considérations nouvelles.

En particulier, le rapport expérimental avec l'instrument se caractérise, contrairement aux "images et aux substituts" habituels, par la nécessité d'un investissement moteur.

La connaissance de l'objet dans les modes de représentation en général ne s'appuie que sur une activité perceptive non motrice (attention d'écoute, cheminement du regard sur la surface du tableau), mais surtout sans échange informationnel (bilatéral) entre l'observateur et l'objet.

L'intérêt de l'ordinateur dans sa fonction de représentation est peut-être de permettre la généralisation de cette notion d'objet, d'objet jouant éventuellement le rôle de symbole, à des systèmes s'adressant globalement à plusieurs sens simultanément, et surtout intégrant un aspect moteur de l'investissement perceptif. Nous donnerons le nom très général de "systèmes-symboles" à ces objets ayant une fonction de représentation et nécessitant, comme c'est le cas pour les instruments traditionnels qui révèlent leur identité au travers d'un échange complexe provoqué par l'observateur, un investissement moteur de celui-ci.

DEUXIEME PARTIE

SYSTÈME GÉNÉRAL POUR LA SIMULATION D'INSTRUMENTS

LE SYSTÈME CORDIS

En corollaire immédiat du primat que nous avons accordé à l'acte instrumental, le centre de notre étude sera l'instrument dont il faut tout d'abord identifier les fonctions, au niveau du tout premier rapport expérimental, en amont même d'un langage musical.

Dans le premier chapitre, nous formulerons plusieurs remarques générales qui nous semblent déterminantes.

Dans le deuxième chapitre, nous donnerons une description du dispositif global que nous développons pour la mise en oeuvre de ces fonctions de base.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons le système de synthèse sonore pour lequel nous envisageons la construction d'un dispositif câblé spécialisé. L'étude que nous avons faite et que nous présenterons ici est une préfiguration logicielle de ce système.

2.1. L'INSTRUMENT

2.1.1. L'instrument, objet concret -

Globalité sensorielle - L'"espace gestuel"

L'instrument se présente, dans l'expérience première, comme un objet matériel, extérieur à l'expérimentateur. Sa structure, ses caractéristiques, son comportement sont définis indépendamment de celui-là et lui sont, dans un premier temps imposés. Au niveau le plus élémentaire, le rapport entre l'instrumentiste et l'instrument est une sorte de "dialogue" par lequel le premier tend à identifier les fonctions du second en établissant expérimentalement les liens entre son action et les réponses de celui-ci.

Un aspect déterminant de ce rapport, lié à la nature concrète de l'instrument est alors la globalité de l'investissement sensoriel. Tous les canaux perceptifs, du moins trois fondamentaux : l'ouïe, la vue, le toucher, sont en cause.

Dans la perspective de la mise en oeuvre d'un dispositif expérimental pour "représenter" l'instrument, il faudra donc prendre en considération trois "espaces sensoriels" interdépendants que nous traduirons en termes de canaux :

- acoustique,
- visuel,
- "gestuel".

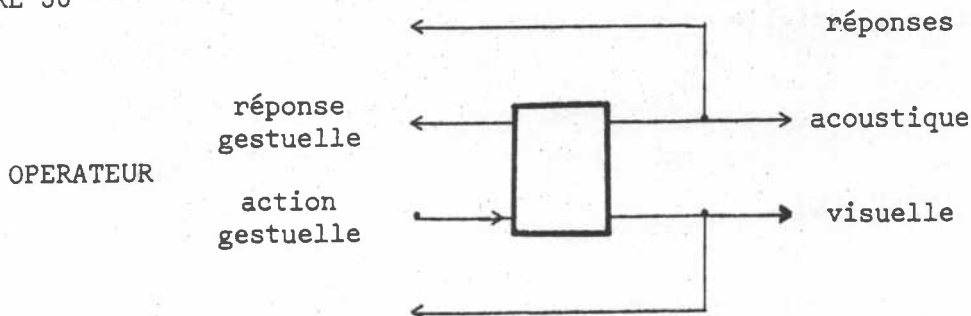
Du point de vue de l'opérateur, le canal visuel et le canal acoustique sont essentiellement des canaux de réception de l'information. Le troisième, que nous avons appelé "toucher" dans un premier temps se distingue des deux autres par son aspect bilatéral.

Nous emploierons à ce propos un terme plus général : le canal gestuel. Il est alors primordial de remarquer que les organes mêmes qui servent, dans la pratique de l'instrument, à communiquer l'information transformée par celui-ci en information acoustique, jouent dans le même temps un rôle de capteurs. Nous appellerons "perception gestuelle" l'ensemble des perceptions, plus générales et plus diversifiées que le simple toucher, qui informent l'opérateur sur un certain nombre de caractères mécaniques de la structure qu'il manipule : état de surface, contours, formes, mais également masse, poids, déformations, élasticités, articulations, frottements, etc. L'ensemble des capteurs qui entrent en jeu dans la perception cénesthétique complémentaire des capteurs tactiles, est en fait complexe et nous n'en donnerons pas la description ici.

Bien que nous ne retenions, dans la suite, dans le terme gestuel, que ce qui relève des actions et perceptions par les doigts, la main, le bras, il faudrait en fait prendre en considération d'autres possibilités comme le souffle (dans le cas des instruments à vent, par exemple) ...

Nous donnerons donc comme première représentation fonctionnelle de l'instrument le schéma élémentaire suivant :

FIGURE 30



qui nous permettra d'insister sur le rôle privilégié du "feed-back" gestuel auquel nous accorderons donc une importance particulière dans le développement du système global.

Il est singulier de constater que, mis à part certaines applications très concrètes comme le pilotage d'engins, engins de chantier, avions..., pour lesquelles c'est l'aspect ergonomique qui a prévalu, cette remarque évidente n'ait pas suscité d'études systématiques et approfondies. Dans le domaine de la recherche musicale, le problème des "accès" c'est à dire de la commande et du contrôle des sons par le geste, a été abordé jusque là, plutôt dans le sens d'une "écriture", graphique ou alphanumérique, des caractères sonores, dans un sens abstrait.

On peut citer cependant le dispositif imaginé par M. MATHEWS, constitué d'une touche dont les caractères mécaniques peuvent être modifiés par une action sur les éléments concrets qui la constituent (raideur des ressorts contrôlant la dureté d'enfoncement).

2.1.2. En amont et en aval de l'instrument

Nous sommes tenus d'évoquer rapidement ici quel cadre global d'attitudes "musicales" se détermine autour de l'acte instrumental et de l'instrument considérés comme centres de l'expérience.

En premier lieu, il faut admettre que le champ expérimental ainsi exploré se situe en amont des codes musicaux établis. Bien que les moyens mis en oeuvre relèvent d'une technologie "sophistiquée" et "très contemporaine", c'est une sorte de "retour aux sources" que l'on tente d'opérer en se plaçant dans les conditions d'un apprentissage, d'une accoutumance à des processus très élémentaires.

Dans cette attitude, il nous faut alors préciser quelques termes et fonctions nécessaires au mode opératoire.

2.1.2.1. PRESTRUCTURATION / JEU

Nous avons supposé, plus haut, que l'instrument était une donnée pré-existante, sans nous poser le problème de son élaboration.

Nous avons évoqué dans la première partie, l'articulation, dans la pratique traditionnelle, entre le rôle du luthier et celui de l'instrumentiste (non pas en tant qu'exécutant ou interprète, mais comme expérimentateur). Les deux rôles convergent vers la création sonore mais se situent respectivement "en amont et en aval" de l'instrument. L'approche du premier est essentiellement antérieure au son, celle du second essentiellement simultanée.

Dans le cadre d'un dispositif informatique associé à ses périphériques spécialisés, les deux pratiques sont en fait concentrées dans un contexte unique, ce qui représente pour le musicien, une condition fondamentalement nouvelle dont on a vu l'intérêt. Il nous semble cependant important de maintenir la distinction entre l'ensemble des démarches dont l'aboutissement est la constitution de la structure qui permettra par des interventions en temps réel, l'émission sonore, et l'ensemble des actions simultanées de cette émission sonore. Nous appelons *préstructuration*, les premières et *jeu* les secondes.

L'articulation *préstructuration / jeu* est ainsi très générale et permet une attitude systématique. Le partage entre les données de préstructuration et les données de jeu est alors déterminé à chaque instant par la nature et le perfectionnement du système, des algorithmes. Cette attitude pragmatique est, à notre sens, le moyen ultime de mettre un terme au "faux-problème" du temps réel dans lequel nombre de démarches s'enferment parce qu'elles partent inconsidérément d'un résultat sonore à obtenir immédiatement, sans tenir compte de ce que la genèse même de l'idée musicale peut être dans l'étape expérimentale. Lorsque les moyens pour cette expérience diffèrent ou progressent, le champ s'élargit mais il n'en reste pas moins qu'il existe un temps où c'est le contexte expérimental qui détermine la pensée.

Une autre question est celle de choisir une démarche particulière pour orienter l'élaboration du système, des formalismes, des langages en fonction de telle continuité et de telle rupture avec les pratiques antérieures. Dans MUSIC V, c'est une morphologie de l'évènement sonore, ramenée à des éléments simples qui est en partie à la base de la démarche et qui détermine la manière de structurer "l'instrument". Dans le cas présent, c'est la référence aux processus mécaniques générateurs de vibrations acoustiques, que nous avons choisi. La préstructuration consistera donc en la construction d'un mécanisme vibrant plus ou moins élaboré.

La recherche du temps réel a ici un sens précis : le système simulant la structure mécanique doit pouvoir répondre en temps réel aux excitations énergétiques qu'on lui imprime. Pour la seconde classe de "jeux" que l'on peut envisager : modulation de certains paramètres de la structure, dans la mesure où cette modulation peut aller de la simple variation lente de l'un d'eux à la remise en cause totale de la structure, c'est en grande partie la nature des principes et algorithmes choisis qui déterminera la limite.

2.1.2.2. LA MEMORISATION

La préoccupation immédiate, pendant la phase expérimentale du jeu est en fait la conservation d'une trace objective de l'expérience.

L'aspect spontané nécessaire au tout premier rapport comme processus immédiat d'investigation, n'a aucune valeur si l'expérimentateur ne dispose pas, en effet, d'un moyen de perception objective de l'essai effectué. Plus précisément, dans ce premier rapport, nous dirons que la perception est essentiellement impliquée et, de ce fait, elle diffère de celle d'un tiers, d'un auditeur, potentiellement des auditeurs ultérieurs.

Plus généralement, c'est grâce à un support objectif que les différents éléments significatifs ou pertinents de cette expérience peuvent être repris, "travaillés", maîtrisés et constituer une structure sonore signifiante susceptible d'être proposée à l'écoute, diffusée.

Il faudrait en fait observer l'histoire de l'écriture musicale pour constater l'importance sur le développement de la maîtrise, de la composition, de la perception même des évènements sonores, de l'apparition des premiers codes graphiques pour noter la musique.

La polyphonie, découverte fondamentale qui domine l'histoire de la musique occidentale au moyen-âge a pris un essor nouveau lorsqu'au XIII^{ème} siècle, partant des neumes, notation du chant grégorien, perfectionnée déjà par

l'adjonction de lignes repères préfigurant la "portée" actuelle, est introduit un système de notation rigoureux de la durée des notes.

Mais le problème de la mémorisation est en fait très général et peut revêtir des aspects très divers. Nous donnerons simplement ici quelques critères selon lesquels nous pensons qu'une étude systématique peut être abordée. Ils sont schématiquement et partiellement mis en application dans le système CORDIS décrit au chapitre 2.3.

1/ En premier lieu, la mémorisation peut porter sur différents aspects de l'expérience.

Le premier et le plus immédiat est en fait, tout simplement, la conservation de l'instrument, dans notre cadre, de la structure. C'est une banalité dans le cas des instruments traditionnels, cependant l'étude de la musique ancienne se heurte souvent, aujourd'hui, à un problème d'importance : l'absence de représentants ou de descriptions suffisamment précises des instruments sur lesquels elle était jouée. Dans le cas très actuel de MUSIC V, le problème est bien clair et l'on a pu être amené, comme en témoigne le catalogue de J.C. RISSET [6] à constituer des "partitions d'instruments" types qui permettent un échange d'expériences d'un studio à un autre.

En supposant ce premier point résolu, il subsiste deux pôles complémentaires :

. *la mémorisation du mode opératoire* , c'est à dire, très généralement, des différentes actions (incluant le geste) effectués en commande et en contrôle de l'instrument ;

. *la mémorisation du résultat sonore* , indépendamment du mode opératoire.

On peut remarquer à ce propos, que la partition traditionnelle procède simultanément des deux.

L'enregistrement par magnétophone, par contre, correspond exclusivement au second cas.

2/ Un deuxième critère peut être mis en avant : selon que la conservation de l'un ou l'autre des aspects (ou leur combinaison) est purement mémorielle (mémoire de l'individu) ou qu'elle fait intervenir un support matériel. Dans le premier cas, nous l'appellerons "mémorisation subjective", "mémorisation objective" dans le second.

3/ Le principe de la mémorisation objective suppose la transposition de la détermination temporelle de l'évènement (sonore ou gestuel...) en une image permanente.

Dans la plupart des cas, cette transposition s'appuie sur une correspondance entre durée et distance : représentation de l'écoulement du temps de gauche à droite et de haut en bas sur une partition, correspondance entre la durée du son et la longueur de la bande magnétique sur laquelle il est enregistré.

Cette transposition s'accompagne également d'un transcodage, l'image permanente de l'évènement temporel sera, en effet, sur le plan perceptif, d'une autre nature : visuelle au lieu de sonore par exemple.

On peut alors distinguer deux nouveaux critères :

a) Dans certains cas, l'"image" sera directement accessible à l'un des sens : c'est, encore ici, le cas de la partition traditionnelle qui peut être lue sans intermédiaire.

Dans d'autres cas, un dispositif de lecture est nécessaire pour rendre l'information mémorisée accessible : le magnétophone en est, bien sûr, l'exemple typique.

b) Le transcodage, à son tour, peut être de deux natures :

- entièrement automatique, soit complètement objectif ; exemples : tracés batygraphiques, oscillographiques, spectrographiques, enregistrements magnétiques, mécaniques, etc.
- s'appuyer sur une convention, soit en réintroduisant le sujet, mais d'une manière collective. La correspondance pourra alors être symbolique ou arbitraire.

Chacun de ces derniers cas ne saurait être utilisé, en fait, à l'exclusion des autres. En effet, leurs fonctions, dans une pratique globale sont complémentaires : ainsi, les transcodages effectués de manière automatique garantissent la restitution la plus objective, cependant, il sont, la plupart du temps, les moins souples et ne permettent pas le transfert, pour la conception et la maîtrise, de l'évènement initial à son support. Le statut de la musique concrète est en grande partie lié à cet aspect : les actions possibles sur la bande magnétique elle-même sont très limitées en regard de la finesse des sons captés et des idées musicales qu'ils peuvent suggérer.

Le code symbolique et le code arbitraire se distinguent également par le fait que, pour le premier, la lecture sera très directe, mais les fonctions possibles de l'élément représentant, limitées. Pour le second, plus général, il nécessitera un apprentissage plus difficile de la liaison entre ce qui est représenté et ce qui le représente.

Au travers de ces critères abordés très rapidement ici, on conçoit l'importance et la généralité de la fonction de mémorisation.

Il n'est pas dans notre intention de la développer de manière approfondie dès les premiers systèmes élaborés dans notre approche. Cependant, il faudrait l'aborder pour chacun des trois dispositifs évoqués plus haut et correspondant aux trois espaces sensoriels en cause.

Elle introduit en fait, dans les phases générales du mode opératoire, le troisième niveau, en aval de l'acte instrumental. On les ramènera donc à trois phases principales :

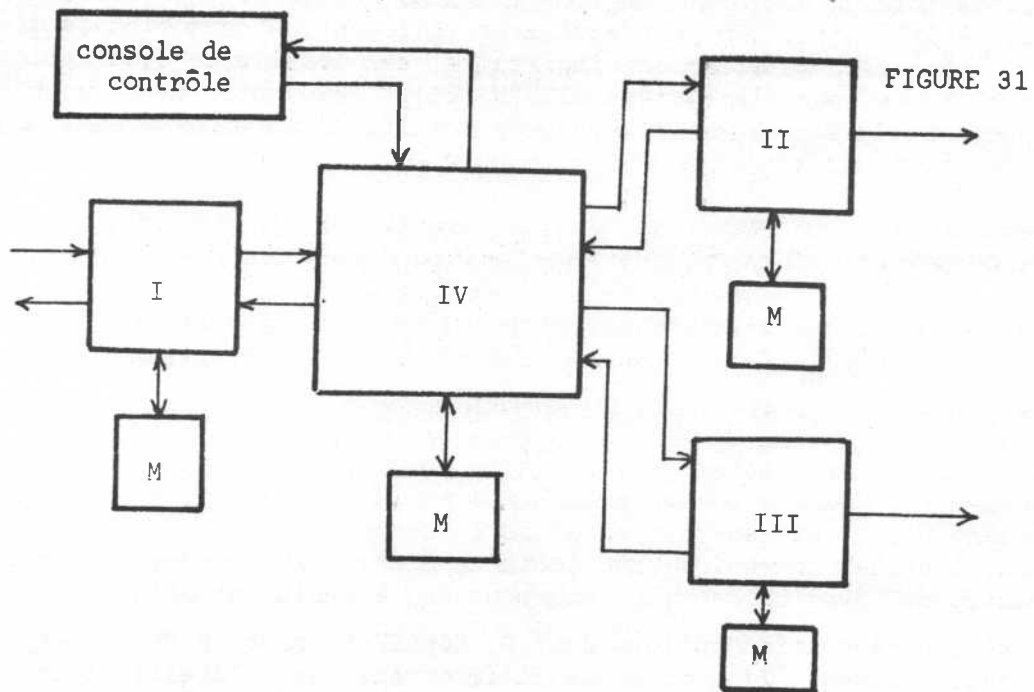
- préstructuration
- jeu
- composition.

En incluant dans les fonctions de l'instrument "au sens le plus général", celle de la mémorisation, l'acte compositionnel peut être considéré comme une extension, une généralisation de l'acte instrumental.

2.2. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL GLOBAL

En fonction de l'ensemble des remarques précédentes, on peut déterminer la configuration globale du dispositif expérimental. Dans ce chapitre, nous la décrirons d'abord sous son aspect général pour ensuite nous intéresser plus particulièrement à chacun des éléments principaux.

Le schéma de l'ensemble est le suivant :



où l'on identifie les organes suivants :

- le terminal ou "console de contrôle"
- I le système gestuel
- II le système acoustique
- III le système visuel
- IV le système de coordination.

Les blocs désignés par la lettre "M" indiquent simplement ici, qu'à chacun des organes peut être associé, dans le principe, un dispositif spécifique de mémorisation.

Nous développerons plus particulièrement au chapitre 2.3 le système acoustique dans la première approche logicielle que nous en avons faite.

2.2.1. Le système gestuel

Dès lors qu'une installation informatique est utilisée pour une fonction spécialisée, se pose le problème des organes de contrôle.

L'organe le plus général est le terminal alpha-numérique, mais sa généralité est rapidement une gêne lorsque l'information à communiquer revêt une forme spécifique. C'est alors le problème très général de la "communication homme - machine" qui est posé.

Dans notre cas, l'information est de type gestuel, encore faut-il, cependant, en différencier plusieurs aspects.

La distinction que nous avons introduite entre les actions de préstructuration et les actions de jeu, est importante, ici.

Les premières, en effet, peuvent être effectuées dans une large mesure par l'intermédiaire d'un système alpha-numérique non spécialisé. Il s'agit là de mettre au point un langage et un codage sous forme de chaînes de caractères alpha-numériques. Toute la difficulté réside dans l'élaboration du système logiciel pour le décodage et non dans les caractéristiques mécaniques du périphérique. On peut envisager également, à condition de disposer d'une installation suffisamment importante, des systèmes de description graphique élaborés comme le système MITSYN [23]. Pour notre part, nous nous contenterons, dans un premier temps, de conditions assez générales pour cette description.

Les secondes font référence au jeu instrumental et, à ce titre, nécessitent une étude particulière.

Nous avons distingué deux classes principales dans les gestes instrumentaux :

2.2.1.1. GESTES D'EXCITATION ET D'ENTRETIEN

C'est l'aspect énergétique qui est, ici, prédominant. Dans le cas du violon, par exemple, l'énergie sonore qui détermine la perception, sur un plan purement quantitatif, est en fait issue de l'instrumentiste. Celui-ci, en agissant sur l'archet communique une certaine énergie au système vibrant, lequel la transforme (avec un certain rendement) en énergie acoustique.

Le critère d'"entretien" qu'introduit P. SCHAEFFER dans sa "Morpho-typologie des objets sonores" [2] montre bien l'importance que l'oreille accorde à la manière dont l'énergie, sur un plan purement phénoménologique, est communiquée à la structure et identifiée dans l'évènement sonore lui-même.

2.2.1.2. GESTES DE MODIFICATION DE STRUCTURE

Ils se caractérisent, à l'opposé, par la faible énergie nécessaire. Dans l'exemple du violon, le déplacement du doigt sur la touche modifie la longueur de la corde sollicitée et, en conséquence, ses caractéristiques vibratoires. L'énergie nécessaire est minimale et, en tout cas, ne participe pas à l'énergie du son. On pourrait concevoir un perfectionnement du mécanisme tel que cette énergie soit pratiquement nulle. Sur le plan sonore, l'effet produit est d'une autre nature et se traduit la plupart du temps par une modulation qualitative.

Cette distinction conduit à l'étude de deux types complémentaires de dispositifs d'accès : les dispositifs passifs et les dispositifs à retour d'effort.

LES DISPOSITIFS PASSIFS

Physiquement, le geste peut être caractérisé par deux types de paramètres : les déplacements et les efforts. L'émission d'information à énergie tendant vers zéro suppose en fait que l'un des deux paramètres tend vers zéro.

On aura alors à nouveau deux catégories de dispositifs dans cette classe : les dispositifs à déplacement nul et les dispositifs à effort nul.

Nous avons mis en oeuvre, dans notre système général, un représentant de chacun d'eux :

a) Capteur à déplacement nul : touche à jauge de contrainte

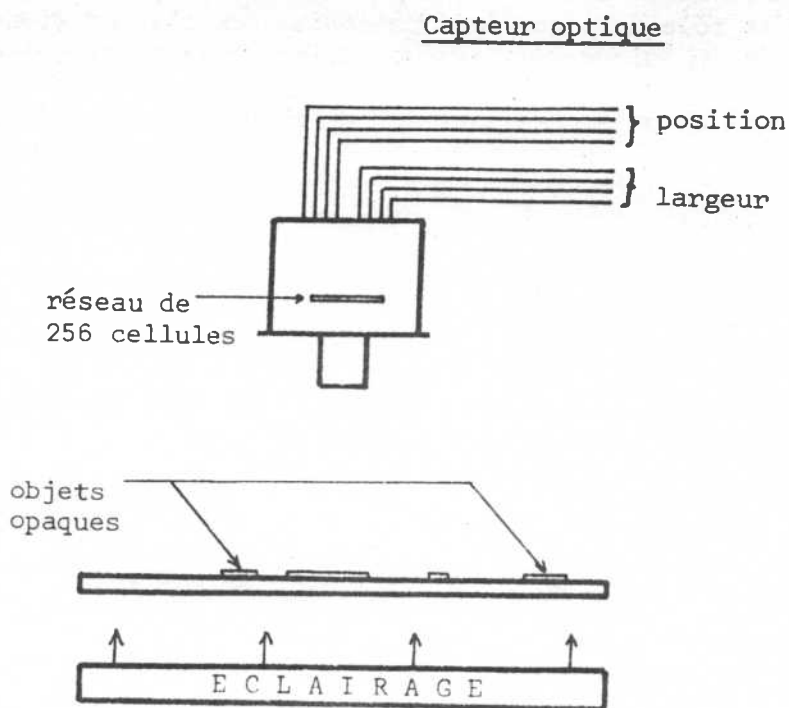
L'action est une force manuelle appliquée à une touche fixe montée sur un anneau dynamométrique. La force appliquée est captée par un pont de jauges monté sur cet anneau. Un conditionneur permet le calibrage de signaux électriques pour leur entrée sur les convertisseurs analogique/numérique de l'ordinateur LSI11.

b) Capteur à effort nul, capteur optique

Une zone d'encombrement analogue à celle d'un clavier traditionnel, est analysée par un système optique qui permet de capter la position à tout instant d'obstacles placés dans le champ (par exemple les doigts ou la main). Ce dispositif, construit par A. LUCIANI, utilise un réseau de 256 cellules photoélectriques placées dans le plan image d'un objectif. L'état de ces cellules est lu dans un balayage à fréquence suffisamment grande pour autoriser des vitesses de déplacements correspondant aux possibilités physiques humaines (vitesse maximale de déplacement de la main sur $300 \text{ mm} < 10 \text{ m/s}$).

La position et la largeur de quatre obstacles placés dans le champ du capteur peuvent être analysées simultanément, offrant ainsi huit signaux de contrôle, évoluant de -5 à +5 volts, compatibles avec les convertisseurs d'entrée de l'ordinateur LSI11 utilisé pour nos expériences.

FIGURE 32



LES DISPOSITIFS A RETOUR D'EFFORT

L'intérêt d'introduire un "feed-back" mécanique au niveau de la commande et du contrôle du son est d'augmenter leur finesse et leur précision. Cependant, l'intérêt du "feed-back" ne se limite pas à cet aspect. La juxtaposition des deux circuits sensoriels : du geste à la perception sonore et du geste à la "perception gestuelle" permet la simulation d'un objet concret. C'est à partir de là en effet que l'on définit le procédé de représentation, non plus de l'"objet sonore" (au sens de SCHAEFFER) mais du "corps sonore" c'est à dire de l'objet matériel dont on peut avoir globalement une approche concrète.

A partir de là, deux directions d'expérimentation sont à envisager :

- Au niveau perceptif élémentaire, la corrélation entre les deux déterminations (mécanique et sonore) de l'objet sur un plan purement subjectif. De quelle manière sera entendu le même signal sonore selon qu'il est associé à tel ou tel processus mécanique perceptible "gestuellement" ? En d'autres termes, cette première catégorie de tests perceptifs devra permettre de déterminer dans quelle mesure le processus de perception s'appuie ici sur la reconnaissance d'une forme exclusivement sonore, apprise antérieurement et appartenant à un patrimoine culturel profondément assimilé, ou s'il est, et dans quelle proportion, déterminé par l'expérience présente et conduit l'opérateur à associer directement le signal sonore à l'objet simulé. Dans ce deuxième cas, on aurait alors affaire à un processus d'apprentissage "total" où le signal sonore jouerait le rôle de signifiant et le système simulé, considéré globalement comme cause initiale de ce signal, le rôle de signifié.

Remarquons ici que cette hypothèse de travail peut être posée grâce au fait essentiel que l'objet" simulé remplit bien, en effet, toutes les conditions de l'*objectivité* dans la mesure où la même expérience pourra être répétée rigoureusement dans des temps différents et par des opérateurs différents.

- Sur le plan esthétique ou, plus généralement, d'un langage expressif, une autre direction d'expérimentation peut être, à plus long terme, envisagée : il faut alors attribuer le rôle de signifiant potentiel non plus au signal sonore, mais à l'objet simulé lui-même. Deux situations peuvent se présenter :

L'objet simulé correspond à un objet existant ou possible, le signe s'établit alors de l'un à l'autre et l'on disposera bien des conditions nécessaires à la définition d'un système de signes puisque, par l'intermédiaire du dispositif, l'objet signifié pourra être évoqué, maîtrisé, intégré dans un contexte.

L'objet simulé peut être, à l'opposé, entièrement nouveau et sans équivalent "naturel". On retrouve ici la même situation, transposée de "l'objet sonore inouï" au corps sonore "inexistant", que, lorsqu'avec MUSIC V on synthétisait, par interpolation ou extrapolation, des sons sans équivalent naturel. C'est bien à nouveau une fonction propre au langage et à tout mode de représentation : celle qui permet de dépasser dans le cadre du système représentant, le cadre de référence de ce qui est représenté. On pourra, dans une investigation d'ordre esthétique, partant de la simulation d'objets connus, tenter, par exemple selon la même démarche d'interpolation ou d'extrapolation, la simulation d'objets nouveaux, augmentant ainsi la richesse des signes possible et offrant également un moyen d'analyser plus en détail les processus perceptifs.

L'étude du système gestuel à retour d'effort est donc une partie importante dans l'élaboration du dispositif global. La réalisation d'un système très général pose sur le plan technique un grand nombre de problèmes. Aussi, le premier prototype, construit dans le cadre de nos recherches, par J.L. FLORENS [16][17] aborde le problème avec, au départ, une réduction des données. L'"espace gestuel" simulé ne comporte en effet qu'un seul degré de liberté (au lieu de six dans le cas simple d'un objet indéformable situé dans l'espace à trois dimensions). Cependant, dans un premier temps, ce dispositif permet une expérimentation suffisamment significative.

La fonction de ce dispositif est donc double : (Figure 33, page 54)

- Capter les paramètres déterminants du geste de l'opérateur : forces et déplacements imprimés à l'objet. Deux capteurs prennent en charge cette première fonction : capteur de force (selon la direction de déplacement) à pont de jauges de contraintes associées à un conditionneur, capteur de position constitué par un enroulement dont les caractéristiques inductives sont modifiées par le déplacement d'un noyau lié mécaniquement au point manipulé.
- Opposer à l'opérateur un comportement mécanique déterminé par un modèle programmé. L'organe en cause ici comprend un élément moteur dont l'énergie est communiquée au point manipulé par l'intermédiaire d'un système de transmission contrôlé électriquement.

Ces deux fonctions constituent la partie du dispositif que nous avons appelée transducteur. Il doit lui être associé un système de simulation traitant les signaux fournis par celui-là et lui communiquant les signaux de contrôle.

Le modèle mécanique peut être construit à partir de fonctions simulant des éléments tels que masses, raideurs, frottements... L'agencement de ces éléments donnera un système cohérent plus ou moins complexe. Dans un premier temps, on a utilisé à cet effet un calculateur analogique. Celui-ci est remplacé actuellement par le système de simulation même dont il sera question plus loin à propos de la synthèse sonore. On peut alors, d'ores et déjà, réaliser la simulation mécanique d'instruments de percussion rudimentaires comme par exemple un gong de masse donnée, percuté par une "mailloche" de masse plus faible, tenue par l'opérateur. Les caractéristiques du gong et de la mailloche peuvent être modifiées et donner lieu à des types de jeu différents.

Sur le plan perceptif, on voit par exemple, dans cet essai, l'importance de la nature du rebondissement au contact des deux masses (figure 34, page 54).

2.2.2. Le système sonore

Sa fonction est d'établir d'une manière particulière, la transposition de signaux à évolution lente issus du système gestuel, en signaux acoustiques. Ce système sera développé en détail dans le chapitre 2.3.

FIGURE 33. Coupleur gestuel

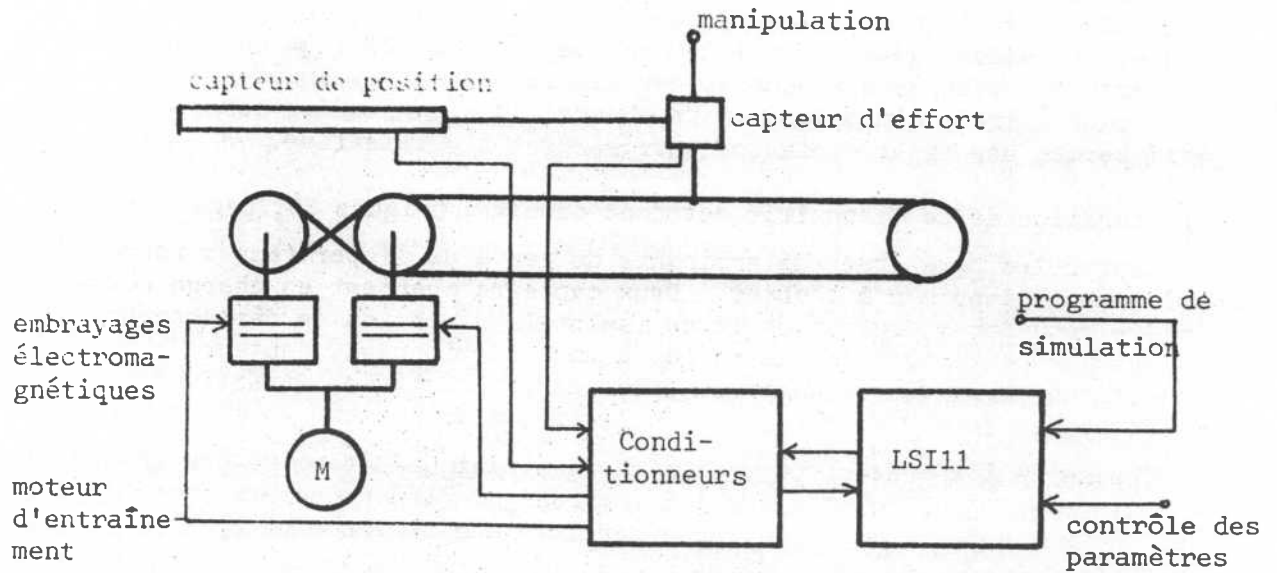
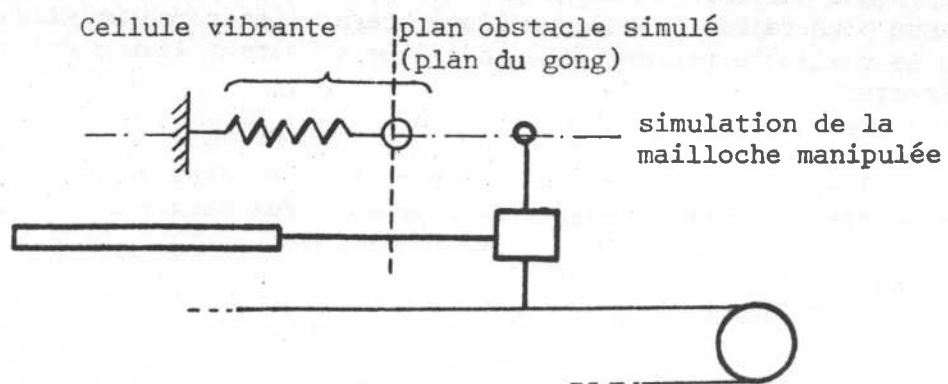


FIGURE 34. Simulation d'un gong



2.2.3. Le système visuel

Le rôle du visuel est également très complexe, du fait, en particulier, qu'il peut intervenir à des niveaux très différents.

On peut l'associer aux deux canaux précédents dans le même but de rendre l'accès à l'objet simulé plus global au niveau perceptif élémentaire. En effet, dans les instruments réels, le processus vibratoire est, dans certains cas, visible (vibration de la corde du violon) mais surtout, la configuration mécanique de l'instrument est, la plupart du temps, directement appréhendée visuellement.

Cependant, la corrélation entre les phénomènes visuels et les phénomènes sonores d'une part, les manifestations gestuelles d'autre part, ouvre un champ d'étude tout à fait général où l'on retrouvera, entre autres, les problèmes particuliers de la partition, c'est à dire de la représentation graphique (pour une mémorisation ou pour un complément à la perception) du "mode opératoire" (partition du geste) ou de l'évènement sonore (partition d'écoute).

Nous avons abordé l'aspect visuel (dans le cadre global de notre recherche) selon deux points particuliers dont le deuxième seulement fait l'objet de l'élaboration d'un système particularisé.

Le premier correspond au propos de donner de l'évènement sonore synthétisé une représentation facilement lisible et adaptée aux variations sensibles à l'écoute, de celui-ci. Le signal acoustique, tel qu'il peut être observé à l'aide d'un oscilloscope, n'est en effet pas d'un grand secours dans ce cadre. Il faut en fait introduire un niveau de représentation symbolique entre les paramètres du son et les caractéristiques de la figure graphique qui lui sera associée. "Symbolique" n'exclut pas ici objectif et reproductible. C'est alors un système de synthèse d'images (selon leur contour simplement dans un premier temps) permettant, de même que pour le système sonore, la génération et le contrôle d'images à partir de paramètres à évolution lente. C'est entre l'évolution des paramètres lents de commande du son et ceux de la commande de l'image que l'on introduira des relations (voir figure 35, page 56).

Cet aspect tient une place purement théorique dans le cadre de nos travaux. Son étude effective constituera une étape ultérieure.

Il nous a semblé plus important, actuellement, d'aborder, sur le plan visuel, non pas le problème de la génération d'images statiques, mais celui de la génération de ce qu'il y a de commun au geste, à l'image en général et au son, soit la détermination temporelle. Depuis le cinéma et la télévision, la représentation par l'image intègre en effet le mouvement.

L'analyse du mouvement de l'image par la caméra habituelle est en fait fondée également sur un échantillonnage temporel (photographie de 24 images par seconde).

Nous avons amorcé un troisième secteur d'étude concernant la réalisation d'un système associant une caméra dont les fonctions de prise de vue (rythme, temps de pose...) sont contrôlées par un processeur spécialisé, à un organe de production du mouvement. Ce dernier est constitué d'une table recevant les objets à filmer (points, figures simples, objets quelconques...), mobile selon deux directions et commandée soit directement par l'un des systèmes gestuels décrits précédemment, soit à partir de fonctions enregistrées à partir de ceux-ci. La production du mouvement et la prise de vue devront alors être coordonnées de manière à restituer le mouvement selon l'allure voulue (fig.36).

FIGURE 35

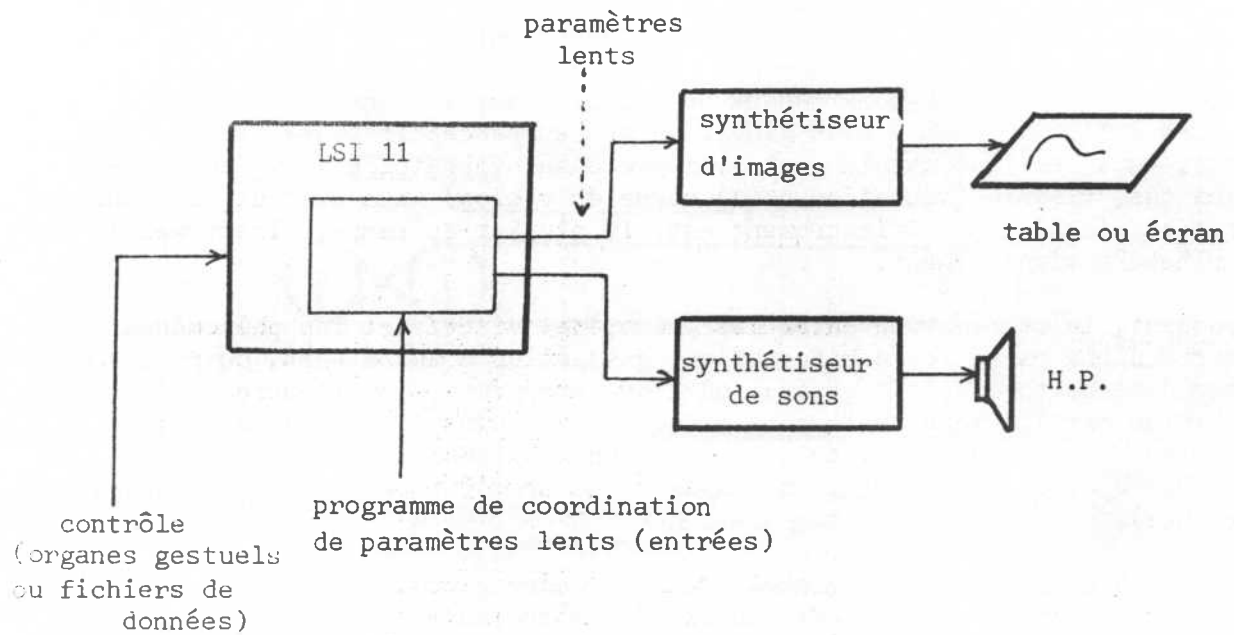
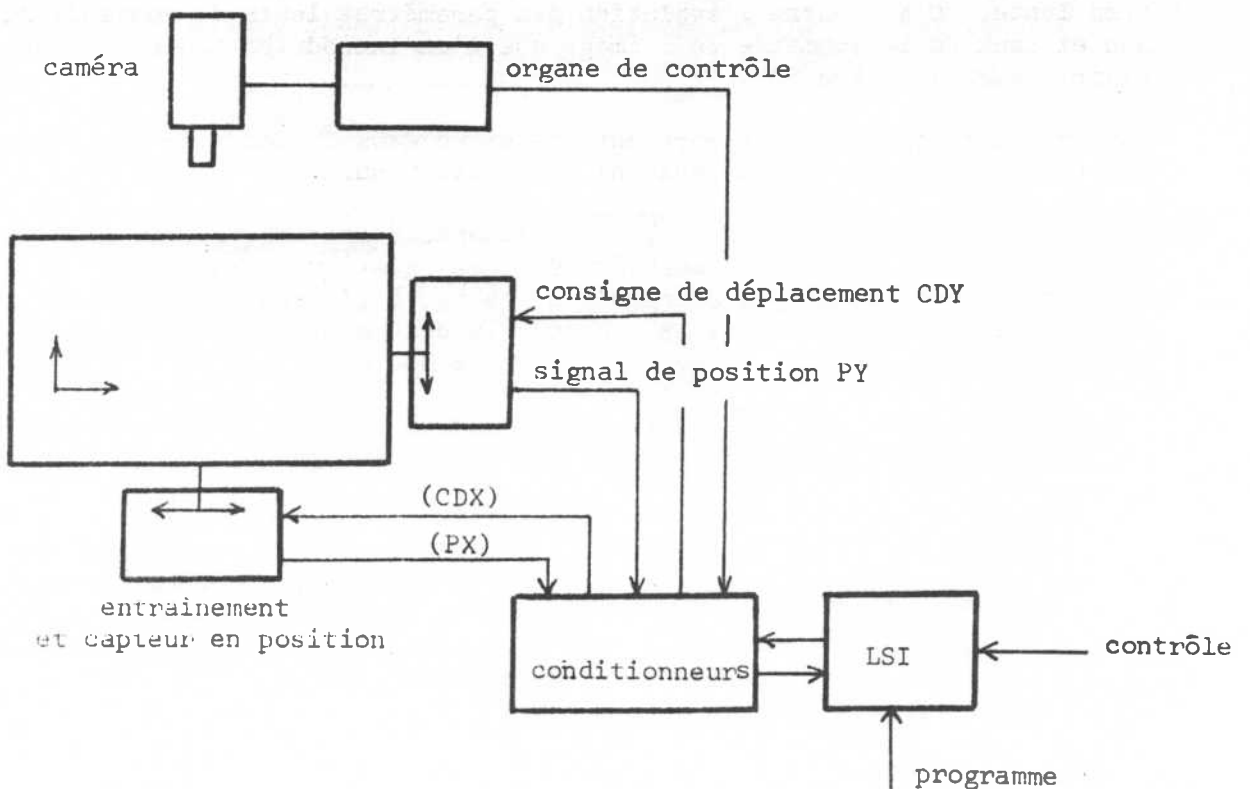


FIGURE 36



L'intérêt d'un tel dispositif est de pouvoir envisager, associée au son, une sorte de "partition dynamique" représentant non plus le temps par l'espace comme c'est le cas jusqu'à présent, mais directement par le temps. Le développement théorique, sur ce point, est complexe. Nous ne l'avons pas abordé.

2.2.4. La coordination des trois systèmes

Le dispositif en cause, dans le cadre de cette fonction, est typiquement, ici, l'ordinateur programmé pour la gestion des différentes étapes d'utilisation : préstructuration, jeu, mémorisation, restitution, traitement a posteriori des éléments mémorisés, etc.

Dans notre cas, le mini ordinateur de type LSI11, associé à un terminal (télétype), à deux platines pour disquettes magnétiques souples, à huit convertisseurs analogique/numérique et à quatre convertisseurs numérique/analogique, remplit parfaitement cette fonction dans la mesure où la coordination s'élabore à partir des signaux lents correspondant à chaque dispositif particulier.

On développera, à propos du système décrit dans le chapitre suivant, une application correspondant à cette fonction.

2.3. LE SYSTEME SONORE (étude logicielle)

LE SYSTEME CORDIS

La fonction du système sonore est de produire, à partir de la donnée de paramètres à évolution lente, des signaux dont la bande passante correspond à la bande audible. Les signaux d'entrée sont issus du système gestuel et, à ce titre, s'ils ne correspondent pas directement aux paramètres physiques caractérisant le geste, ils ont en commun avec eux le fait que le débit d'information qui les caractérise est faible. Nous parlerons de "signaux lents". Dans le contexte digital, où les signaux sont, à l'entrée et à la sortie du système, des fonctions échantillonnées, il est facile d'évaluer, dans le cas le plus général, les débits d'information correspondants, en prenant pour chacun le même moyen de mesure.

Les signaux lents seront échantillonnés à une fréquence maximale de 100 Hz tandis que les signaux rapides (acoustiques) pourront l'être à une fréquence d'au moins 10 kHz (bande passante correspondante : 5 kHz). Chaque échantillon est représenté, dans les deux cas, par un mot binaire de 16 bits. Si l'on considère, en entrée, comme en sortie, que chaque niveau est équiprobable, le débit d'information maximal sera :

en entrée : $16 \cdot 10^2$ bits par seconde,

en sortie : $16 \cdot 10^4$ bits par seconde.

La dissymétrie entre ces deux débits nécessite quelques mots d'explication.

Il y a deux façons d'aborder le problème :

- Selon la première, on considère que l'entrée ne consiste pas exclusivement en la donnée des variations des paramètres de commande, en temps réel, mais en l'ensemble des opérations de préstructuration et de jeu. L'égalité entre la quantité d'information en entrée et en sortie est alors bien réalisée si l'on considère qu'au moment du jeu, le signal de sortie procède à la fois des commandes et de l'"information structurelle" contenue potentiellement dans le dispositif et communiquée au moment de la préstructuration.

- Selon la seconde, on peut se placer dans les conditions de l'expérimentateur qui ignore tout de la structure qu'il utilise pour n'avoir pas participé (c'est la situation habituelle de l'instrumentiste) à son élaboration. Ce qu'il faut alors comparer, ne relève pas des signaux observés dans leur "microscopie" à l'aide d'appareils de mesure, mais directement de la perception qui effectue, dans l'ensemble des signaux différents, observés à l'échantillon près, une réduction en classes de signaux non différenciables par l'oreille, en fonction des données physiologiques et aussi de l'entraînement. On peut supposer que toutes les variations des paramètres de commande sont volontaires et, de ce fait, que l'opérateur a une mesure perceptive de la complexité de l'information communiquée au dispositif au travers de son jeu.

Deux situations sont alors possibles :

. La nature du dispositif intermédiaire est parfaitement identifiée. Dans ce cas, l'opérateur reçoit au travers de l'émission sonore, une première information lui permettant de reconnaître ce dispositif, mais surtout, toutes les variations du signal sonore seront perçues selon une complexité équivalente à celle des actions de commande. Dans ce cas, l'égalité entre le débit d'information en entrée et en sortie est réalisée.

. La nature du dispositif intermédiaire ne peut être rattachée à aucun objet connu de l'opérateur. Au travers de l'expérimentation, celui-ci cherchera alors à différencier ce qui est propre à ses actions volontaires de ce qui procède de la structure elle-même. Celle-ci peut être alors considérée comme source d'information tant que l'ensemble des comportements qu'elle manifeste n'est pas entièrement appris. La complexité des signaux perçus est, naturellement, dans ce cas plus grande que celle des signaux de commande.

Dans tous les cas, on peut établir la symétrie en considérant donc, non seulement les débits d'informations qui imposent une comparaison sur des durées égales pour le contrôle et le résultat, mais en incluant dans les informations d'entrée, l'information communiquée par le jeu et l'information structurelle, quels que soient le mode et la durée pour sa détermination.

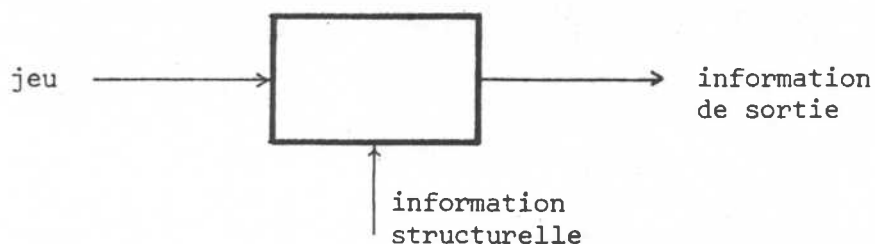


FIGURE 37

Ces remarques ont une certaine incidence sur la manière même d'aborder la définition du formalisme de synthèse, puisque c'est lui qui conditionnera en grande partie l'articulation entre ce qui renvoie à des processus connus et ce qui imposera un apprentissage nouveau.

Dans le cas de MUSIC V, on a vu que la génèse de ce formalisme procédait de trois approches complémentaires :

- approche musicienne (au niveau élémentaire) avec la décomposition du son selon sa "forme" et sa "mat re",
- approche physicienne, par l'acoustique, établissant des relations élémentaires entre les paramètres acoustiques et ces caractères sonores : formes d'onde et d'enveloppe, amplitude, fréquence...,
- aspect algorithmique pour représenter ces fonctions par des instructions propres à la machine.

Dans notre démarche, en fonction des hypothèses posées, les trois approches seront d'un autre ordre :

- analyse du geste instrumental élémentaire,
- analyse physique des mécanismes vibratoires,
- aspect algorithmique.

Le premier aspect a été abordé rapidement, plus haut, à propos des systèmes gestuels qui fournissent donc les signaux d'entrée, lents. Ce sont ces derniers qui serviront d'entrée aux systèmes simulant des mécanismes vibratoires produisant les signaux sonores et que nous allons décrire maintenant suivant les deux autres approches.

Le problème peut donc être posé maintenant très clairement. La simulation de mécanismes vibratoires nous conduit à prendre comme référence, à la place de signaux sonores élémentaires, des objets mécaniques. Dans le cadre de cette préfiguration logicielle du système de synthèse, les algorithmes seront donc construits à partir des instructions élémentaires du langage machine de l'ordinateur LSI11 utilisé.

2.3.1. Simulation d'une particule vibrante - Processus récursifs

Par analogie à la démarche d'analyse nécessaire, dans le cas de MUSIC V, pour décomposer un  v nement sonore complexe en ses éléments constitutants, on est amené ici à décomposer des objets vibrants complexes en éléments simples.

Le premier modèle choisi pour représenter un système vibratoire élémentaire est un oscillateur harmonique constitué d'une masse soumise à une force de rappel vers un point fixe, et à un frottement. Ce choix n'est pas arbitraire : d'une part le signal obtenu par excitation d'un tel système correspondant à une sinusoïde amortie exponentiellement, contient en lui-même toutes les déterminations d'un  v nement sonore concret défini en hauteur, en intensité et en durée. D'autre part, on peut le produire à partir d'un algorithme très simple représenté par l'équation de récurrence :

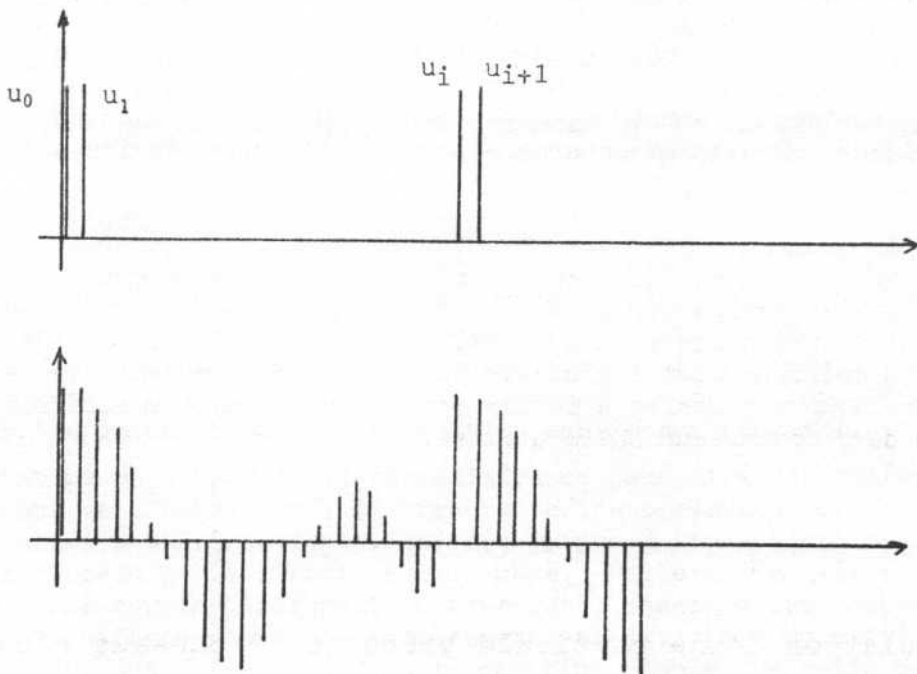
$$u(n) = a \times u(n-1) + b \times u(n-2) \quad (1)$$

qui permet le calcul de l'échantillon $u(n)$, à tout instant à partir des deux échantillons antérieurs et de deux coefficients. Quatre mémoires suffisent ici pour $2 \times 512 = 1024$, pour obtenir le même signal à l'aide de l'oscillateur de MUSIC V. L'ensemble des signaux obtenus à partir de l'oscillateur harmonique, n'a bien évidemment pas, cependant, la même généralité que dans le cas de l'oscillateur précédent.

On peut identifier directement, dès ce niveau, la fonction d'"adaptation du débit d'information" : les quatre données, les coefficients a et b et les deux premiers échantillons peuvent être déterminés par la commande sous la forme de quatre signaux d'entrée échantillonnés à une fréquence maximale de 100 Hz. Entre chacune des interventions correspondant à ces échantillons, l'algorithme calculera les échantillons acoustiques au rythme de la fréquence d'échantillonnage de sortie (10 kHz par exemple).

On peut par exemple imposer, indépendamment de l'évolution du signal de sortie, deux échantillons ($u_0, u_1, \dots, u_i, u_{i+1}$) à des instants quelconques entre lesquels le signal suit une évolution sinusoïdale amortie.

FIGURE 38.



On peut également distinguer les deux types d'intervention de commande ou de jeux que nous avons évoqués plus haut :

Jeu énergétique : il correspond à la donnée des deux échantillons initiaux u_0, u_1 à un instant quelconque, qui déterminent l'amplitude et la phase du signal, pour une même fréquence et un même temps d'amortissement.

Jeu de modification de la structure : il correspond à la variation que l'on peut imposer aux paramètres a et b qui produira une variation de la fréquence et de l'amortissement du signal comme le montrent les expressions ci-après :

l'équation (1) peut être écrite, pour la simplicité des expressions, sous la forme :

$$u(n) = 2A u(n-1) - B u(n-2) \quad ; \quad (2)$$

la solution de cette équation est de la forme, en posant $t = n \times T_e$ où T_e est la période d'échantillonnage :

$$u(t) = E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \sin(2\pi f t + \phi)$$

avec :

$$A = \exp\left(-\frac{T_e}{\tau}\right) \cos 2 \pi \frac{f}{f_e} \quad (3)$$

f_e : fréquence d'échantillonnage ;

$$B = \exp\left(-2 \frac{T_e}{\tau}\right) ; \quad (4)$$

$$U_0 = E \sin \phi ; \quad (5)$$

U_0 : premier échantillon ;

$$U_1 = \exp\left(-\frac{T_e}{\tau}\right) E \sin\left(2 \pi \frac{f}{f_e} + \phi\right) \quad (6)$$

U_1 : second échantillon ;

On peut remarquer que la donnée de A et B détermine entièrement la fréquence et l'amortissement du signal.

U_0 et U_1 déterminent l'amplitude et la phase. Cependant, ces deux dernières pour des valeurs fixées de U_0 et de U_1 dépendent également de A et de B.

On pourrait être tenté ici, utilisant les relations (3) à (6), de définir le signal à partir de ses paramètres acoustiques f , τ , E et ϕ . Ceci reviendrait à la démarche d'analyse et de synthèse à partir des données acoustiques du signal. Il est plus cohérent de considérer directement les paramètres A, B, U_0 et U_1 comme les paramètres de contrôle du processus. De plus, on évite, à chaque donnée d'entrée, les calculs nécessaires pour déterminer, partant des relations ci-dessus, les valeurs de A, B, U_0 et U_1 à partir des grandeurs acoustiques.

Dans une mise en oeuvre préliminaire de cet algorithme (en langage FORTRAN), nous avons pu évaluer les limites et les facilités de contrôle de ce dispositif élémentaire. Des essais de synthèse de sons simples (son de cloche) ont pu être faits en superposant plusieurs cellules correspondant à cet oscillateur harmonique.

La comparaison des temps de calculs dans ce cas et dans le cas de sons identiques obtenus à l'aide de MUSIC V est concluante puisque, pour une même machine (PDP11) et un même langage (FORTRAN), le rapport est de l'ordre de 1/3 en faveur du premier.

Cependant, ce cas d'utilisation est particulier car les sons de cloches ou de "tôle" sont caractéristiques par le fait que leur décomposition en sinusoïdes amorties est très aisée.

Pour obtenir des sons plus complexes et plus riches, il faut en fait poser le problème de la combinaison des éléments d'une manière plus générale.

C'est ce que nous aborderons maintenant en décrivant le principe des algorithmes mis en oeuvre dans le système "CORDIS".

2.3.2. Algorithmes de base - Simulations d'éléments mécaniques

Rappelons les principes généraux pris en considération :

- les processus de référence sont empruntés à la mécanique ; les éléments mis en oeuvre seront des masses, des éléments élastiques (ressorts), des éléments de frottement. Les paramètres décrivant l'évolution des systèmes seront les forces et les déplacements.
- le recours aux processus récursifs sera à la base des algorithmes dans la mesure où ils permettent une optimisation des éléments de mémoire à mettre en oeuvre.

2.3.2.1. REPRESENTATION DE LA MASSE

Partons du système continu dans le temps correspondant à une masse m , soumise à un ensemble de forces de résultante F .

L'équation différentielle décrivant ce système est donnée par la relation fondamentale de la dynamique :

$$F(t) = m \gamma(t) \quad (7)$$

Transposons au cas d'un système discontinu dans le temps en posant $t = n T_e$ où T_e est la période d'échantillonnage. On pourra prendre, pour les calculs, $T_e = 1$; la variable décrivant le temps sera alors n .

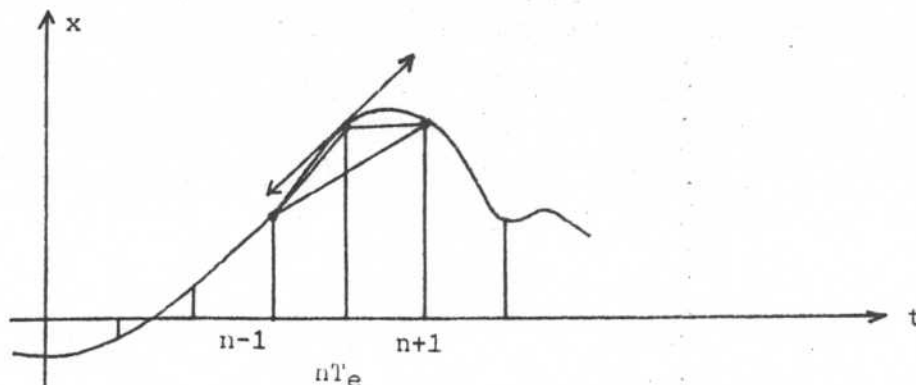
Pour chaque valeur de n , on aura alors une valeur de la force résultante que l'on écrira $F(n)$.

La position de la particule pourra être également décrite, à "chaque instant" par $x(n)$.

Il faut alors donner, dans ce cadre numérique, un équivalent de la vitesse $v(n)$ et de l'accélération $\gamma(n)$.

REPRESENTATION DE LA VITESSE

FIGURE 39.



Dans le cas du système continu, la vitesse $v = x'(t)$ est représentée sur le graphe $x(t)$ par la tangente à la courbe au point $t = n T_e$.

Partant des échantillons $x(n-1)$, $x(n)$, $x(n+1)$, etc., aucune relation simple ne donne exactement le correspondant de $x'(t)$. Pour représenter la vitesse, on doit donc faire un choix en partie arbitraire. Le plus simple, pour des raisons qui apparaîtront par la suite, consiste à poser :

$$v(n) = x(n) - x(n-1) .$$

De même, pour l'accélération $\gamma(t) = v'(t)$, on prendra :

$$\gamma(n) = v(n) - v(n-1) = x(n) - 2x(n-1) + x(n-2) .$$

On peut alors écrire l'équivalent discontinu de l'équation (7) sous la forme :

$$F(n) = m [x(n) - 2x(n-1) + x(n-2)]$$

soit, en prenant un système de forces réduites :

$$f(n) = F(n) / m$$

$$f(n) = x(n) - 2x(n-1) + x(n-2) . \quad (7')$$

Cette équation aux différences sera donc représentative d'un système élémentaire correspondant à une masse soumise à chaque instant à un ensemble de forces de résultante $f(n)$.

On sera donc amené à étudier, d'une manière générale, des systèmes régis par des équations aux différences. L'étude des solutions dans les cas élémentaires essentiels relatifs à ce propos a fait l'objet, au sein de notre groupe de recherche, d'un travail de T. BERBERYAN [13]. Nous nous contenterons, dans la suite de cet exposé, de citer les résultats littéraires obtenus*.

Dans ce premier cas, l'étude de l'équation aux différences (7') est à comparer à celle de l'équation (7) sous sa forme réduite : $f(t) = \gamma(t)$.

On peut effectuer cette comparaison à partir des réponses impulsionnelles dans les deux cas.

L'excitation f_0 impulsionnelle sera alors définie :

dans le cas du système discontinu par :

$$f_0(n) = \begin{cases} f_0 = c^{te} & \text{pour } n = 0 \\ 0 & \text{pour } n \neq 0 \end{cases}$$

et dans le cas du système continu par :

$$f(t) \text{ telle que } \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} f(t) dt = 1_0 = c^{te}, \forall \epsilon .$$

* Les calculs théoriques s'appuient sur les problèmes traités dans les ouvrages de GOLD et RABINER [19], GOLD et RADER [20], OPPLHEIM [21] et BRAUN [22].

Réponse impulsionnelle du système discontinu :

$$x(n) = (n+1)f_0 \quad ; \quad (8')$$

réponse impulsionnelle du système continu :

$$x(t) = f_0 t \quad (8)$$

soit, en posant $t = n T_e$ et $T_e = 1$ pour comparer les expressions pour des valeurs égales de la variable :

$$x(n) = n f_0 .$$

Dans (8'), on voit que le point matériel, comme dans (8), soumis à une excitation impulsionnelle acquiert un mouvement de vitesse constante, proportionnelle à l'amplitude de l'impulsion. Il existe cependant une différence pour $n = 0$:

$$x(0) = f_0 \quad \text{pour le système discontinu,}$$

$$x(0) = 0 \quad \text{pour le système continu.}$$

Les deux réponses sont décalées de la valeur constante f_0 . Cependant, la valeur numérique, dans les applications, de f_0 est en général très faible par rapport aux valeurs significatives de $x(n)$ ce qui permet, dans la pratique, de négliger cette différence. Il est évident, en effet, que dès que n est $\gg 1$, $n+1$ est très peu différent de n .

2.3.2.2. REPRESENTATION DES ELEMENTS ELASTIQUES ET DE FROTTEMENT

Appliqués à la masse précédente, ils interviennent sous la forme d'une contribution à l'ensemble des forces appliquées à celle-ci, dépendant de l'état du système : position, vitesse.

On définira alors la résultante f comme la somme de forces extérieures (ou d'excitation) f_e , et de forces internes f_i : $f = f_e + f_i$.

PREMIER CAS : FORCE DE RAPPEL (élément élastique)

Elle peut être définie comme dépendant de la position du point matériel, à chaque instant :

$$f_r(n) = -k x(n) \quad ,$$

k étant l'analogie d'une constante de raideur. L'équation (7') s'écrit alors :

$$x(n) = f_e(n) - k x(n) + 2x(n-1) - x(n-2) \quad (9')$$

soit :

$$(1-k) x(n) = f_e(n) + 2x(n-1) - x(n-2) .$$

Dans le cas précédent, l'aspect algorithmique n'a été évoqué que par l'expression de l'équation aux différences. On peut l'exprimer plus explicitement, sans faire appel, pour l'instant, au langage machine (ASSEMBLEUR - L0111) qui permettra sa mise en oeuvre effective, sous la forme de diagrammes :

ainsi, à l'équation (7') correspondrait le diagramme :

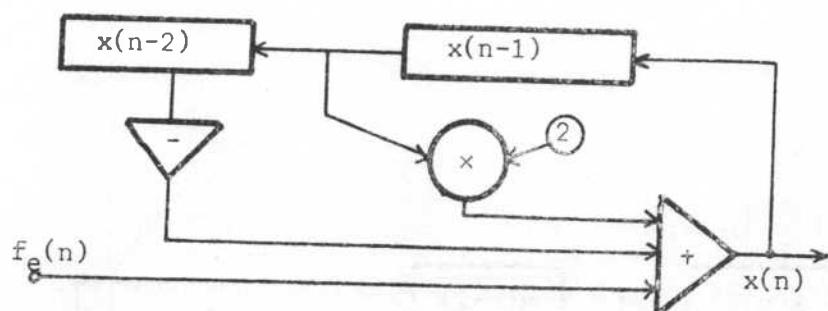


FIGURE 40

faisant apparaître essentiellement les fonctions suivantes, entre le signal d'entrée $f_e(n)$ et le signal de sortie $x(n)$:

- un additionneur,
- deux éléments de mémorisation permettant de conserver les deux derniers échantillons calculés.

Le diagramme correspondant à l'équation (9') serait alors :

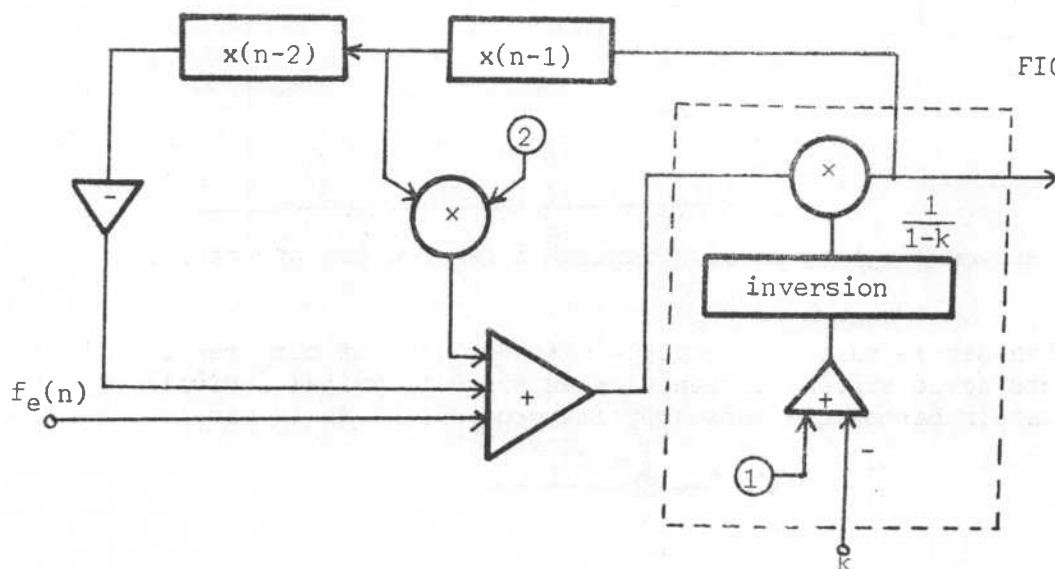


FIGURE 41

faisant apparaître une entrée de contrôle correspondant au paramètre k , mais également un dispositif supplémentaire comportant :

- un additionneur,
- une division (inversion),
- un multiplieur.

Dans le souci d'alléger cet algorithme, nous avons introduit ici une simplification qui pourra être généralisée par la suite, dans la manière de définir l'intervention d'une force ou d'une grandeur dépendant de l'état du système.

En effet, l'équation (9') et le diagramme correspondant se simplifient de façon appréciable pour la mise en oeuvre si l'on définit la force interne (ici force de rappel) agissant à l'instant n , non pas en fonction de la position à l'instant n , mais à l'instant précédent $n-1$:

$$f_p(n) = -k x(n-1)$$

(9') devient alors :

$$x(n) = f_e(n) + (2-k) x(n-1) - x(n-2) \quad (9'')$$

à laquelle on peut attacher le diagramme :

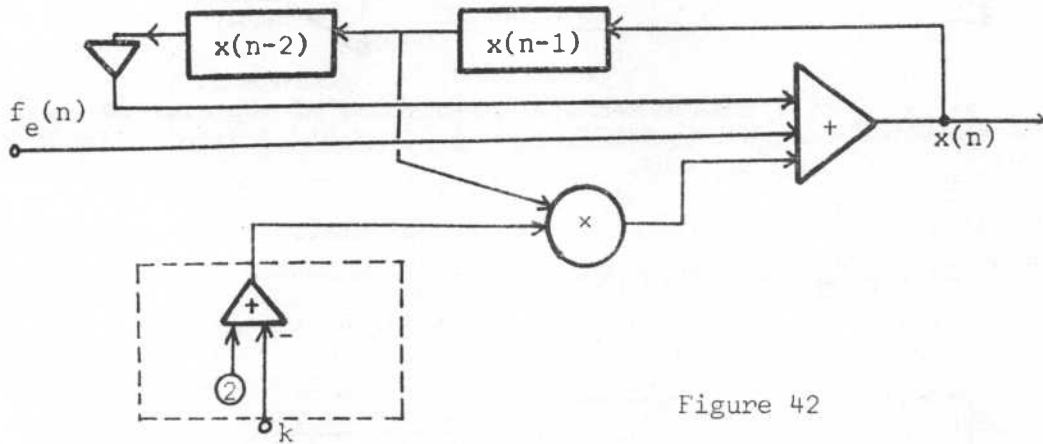


Figure 42

où l'on a seulement ajouté un additionneur à la première structure.

Pour évaluer la validité de cette méthode, il faut comparer les différents aspects de ce système élémentaire au modèle physique équivalent, soit à un oscillateur harmonique sans amortissement défini de la manière suivante :



et régi par l'équation différentielle :

$$x''(t) + k x(t) = f_e(t) \quad (9)$$

Bornons-nous ici à la comparaison des réponses impulsionnelles dans chacun des cas.

Cas du modèle physique

L'impulsion de force est définie par :

$$f_0(t) \text{ telle que } \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} f(t) dt = f_0$$

Reponse impulsionnelle :

$$x(t) = \frac{f_0}{\omega} \sin \omega t \quad ,$$

soit, en posant $t = n T_e$ avec $T_e = 1$:

$$x(n) = \frac{f_0}{\omega} \sin n\omega \quad \text{avec } \omega = \sqrt{k} \quad (10)$$

On peut tracer le graphe de $\omega(k)$:

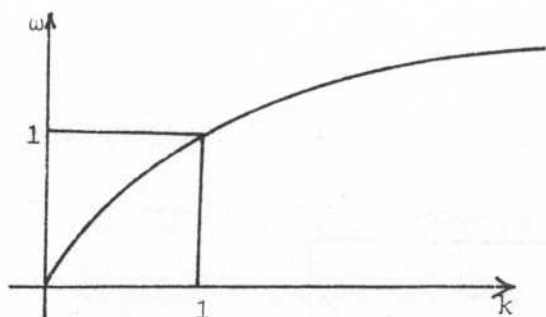


Figure 43

ainsi que celui de l'amplitude $E(k)$:

$$E = f_0 / \sqrt{k} .$$

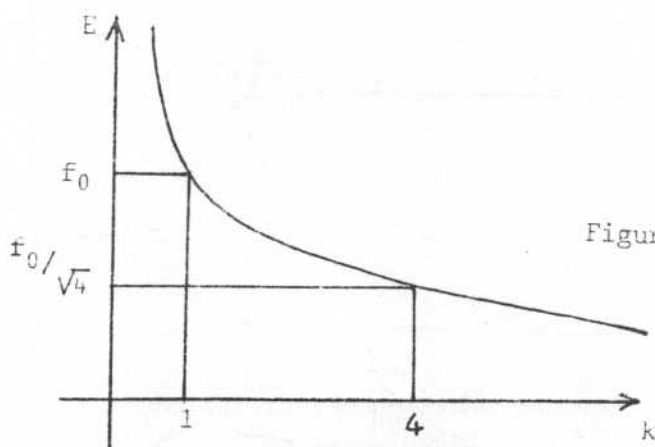


Figure 44

Cas du système régi par l'équation (9'')

L'impulsion de force est définie par :

$$f_0(n) = \begin{cases} 0 & \text{pour } n \neq 0 \\ f_0 & \text{pour } n = 0 . \end{cases}$$

Réponse impulsionnelle :

$$x(n) = \frac{f_0}{\sin \alpha} \sin(n+1)\alpha \quad (10')$$

avec α tel que $\cos \alpha = (2-k)/2$, pour $n \geq 1$, $x(n) \neq \frac{f_0}{\sin \alpha} \sin n\alpha$.

α joue donc ici le même rôle que ω précédemment.

Les réponses (10) et (10') sont qualitativement équivalentes. Il faut alors comparer quantitativement, pour des valeurs identiques des paramètres f_0 et k , l'amplitude et la pulsation dans les deux cas.

Soit à comparer :

a) $E = f_0/\sqrt{k}$ et $E' = f_0/\sin \alpha$ avec $\cos \alpha = (2-k)/2$ d'une part,

et :

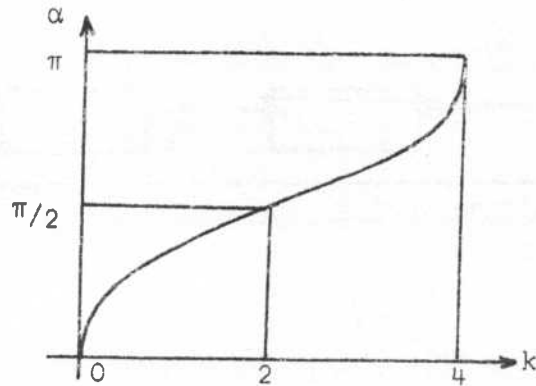
b) $\omega = \sqrt{k}$ et $\alpha = \arccos \frac{2-k}{2}$

d'autre part.

De $\alpha = \text{Arcos}((2-k)/2)$, on déduit que k doit être compris dans l'intervalle $[0,4]$ alors que, dans le cas du système continu, $k \in [0, +\infty]$.

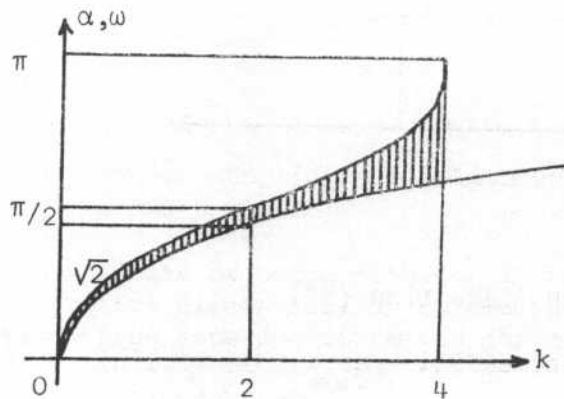
* le graphe de $\alpha(k)$ est le suivant :

FIGURE 45



Comparé à celui de $\omega(k)$, on obtient :

FIGURE 46



Les deux courbes sont très voisines lorsque $k \neq 0$.

L'écart augmente lorsque k augmente. Il est maximum pour $k = 4$ qui donne, dans le cas du système discontinu, la pulsation de SHANNON (demi-pulsation d'échantillonnage).

Quantitativement, l'erreur relative peut être évaluée selon les diverses valeurs de k .

Soit ϵ_r cette erreur, définie pour une valeur de k donnée par :

$$\epsilon_r = \frac{\alpha(k) - \omega(k)}{\omega(k)} .$$

On obtient, pour différentes valeurs de k correspondant à :

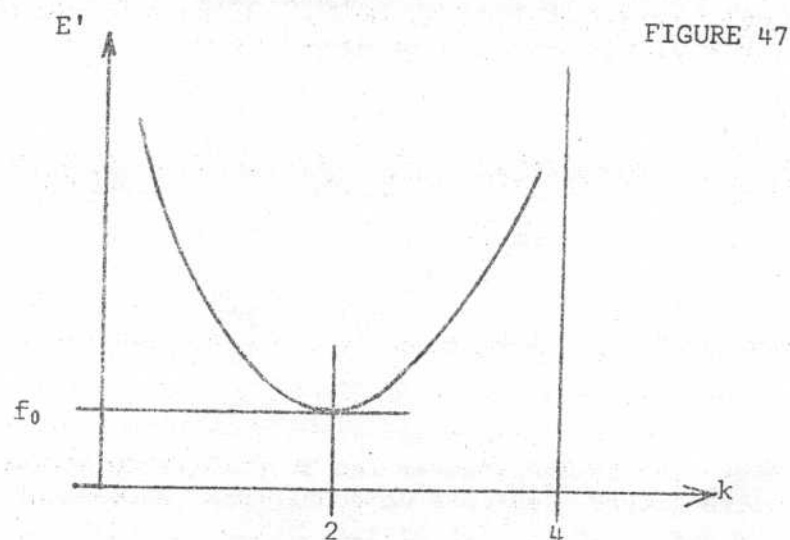
$\omega = \omega_s/2$	$\epsilon_r \neq 10 \%$	(ω_s : pulsation de SHANNON)
$\omega = \omega_s/2,5$	$\epsilon_r \neq 7 \%$	

$$\begin{array}{ll} \omega = \omega_s/3 & \epsilon_r \# 5 \% \\ \omega = \omega_s/4,5 & \epsilon_r \# 2 \% \\ \omega = \omega_s/10 & \epsilon_r \# 0,4 \% \end{array} ;$$

pour $\omega > \omega_s/2$ l'erreur augmente rapidement ; elle est maximale et égale à :

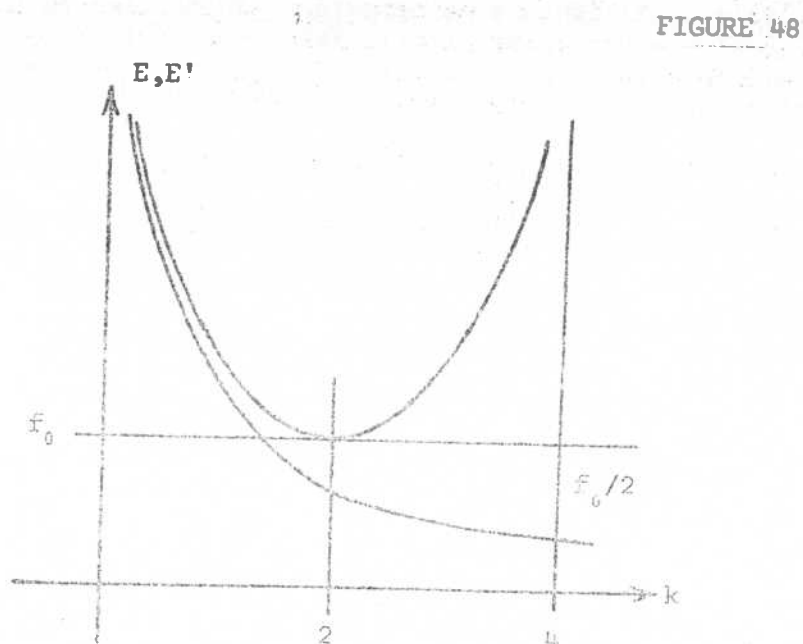
$$\epsilon_r = \frac{\pi - 2}{2} \# 57 \% \text{ pour } \omega = \omega_s \quad (k = 4).$$

* le graphe de $E'(k)$ est le suivant :



Il est symétrique par rapport à l'axe $k = 2$.

On peut le comparer à celui de $E(k)$; on obtient :



De même que précédemment, les courbes sont voisines pour $k \neq 0$. L'écart croît très rapidement pour $k > 2$ et devient infini pour $k = 4$.

La correspondance qualitative est réalisée pour les valeurs de k inférieures à 2. En effet, dans les deux cas, l'amplitude diminue lorsque k augmente. Au delà de $k = 2$, cette correspondance n'est plus réalisée puisque, dans le cas du système "naturel", une augmentation de k implique une diminution de l'amplitude (en effet, plus la raideur du ressort est grande, plus l'amplitude des oscillations est faible pour une même amplitude de l'excitation), alors que dans le cas du système discontinu une augmentation de k implique une augmentation de l'amplitude.

Quantitativement :

l'erreur relative ϵ_r définie, pour k donné, par :
$$\epsilon_r = \frac{E' - E}{E}$$
 varie de 1 % à 16 % pour k variant de 0 à 2.

Elle est plus importante que l'erreur sur la pulsation.

Conclusions pour ce premier cas :

1/ Pour les valeurs de $k < 2$, la représentation du modèle "naturel" par l'algorithme défini par l'équation (9") est satisfaisante.

2/ Pour les valeurs de k comprises entre 2 et 4, l'algorithme (9") ne représente plus qualitativement toutes les propriétés du système naturel. Cependant, notre propos n'est pas de donner une représentation absolue de ce système physique comme si l'on devait utiliser les signaux produits dans un cadre d'analyses ou de mesures, mais de mettre en oeuvre un dispositif simple où la relation entre les entrées de contrôle et le signal produit soit facile à établir par expérimentation. Le modèle proposé ici est rattaché, donc, pour une part à un modèle connu, pour l'autre part, on peut considérer qu'elle conditionnera le caractère particulier du formalisme de synthèse. Pour évaluer alors la validité de cette méthode, ce n'est pas au niveau élémentaire où l'on se situe ici qu'on pourra le faire, mais dans le cadre d'une expérimentation plus proche du propos initial, soit musicale.

Avant d'en arriver là, il nous faut poursuivre dans la définition générale de ce formalisme.

DEUXIEME CAS : FORCE DE FROTTEMENT

De même que précédemment, on pourrait l'introduire en la définissant par la relation :

$$f_f(n) = - \xi v(n)$$

Pour la même raison de simplification, on la définira directement par :

$$f_f(n) = - \xi v(n-1) \quad \text{soit} \quad f_f(n) = - \xi (x(n-1) - x(n-2))$$

ξ étant l'analogie d'une constante de frottement visqueux.

L'équation aux différences s'écrit alors :

$$x(n) = f_e(n) + (2 - \xi) x(n-1) - (1 - \xi) x(n-2) , \quad (11')$$

le diagramme correspondant étant :

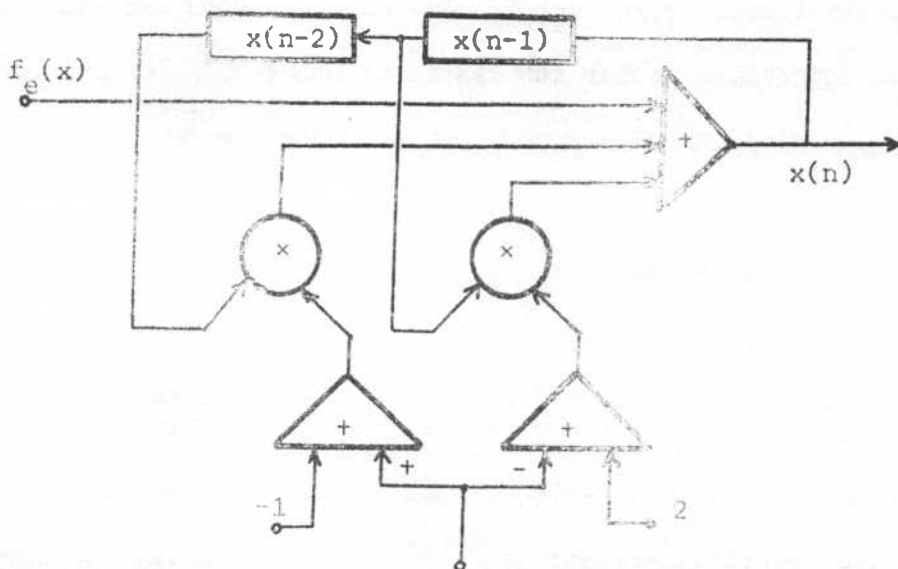


Figure 49

Le modèle physique est le suivant :

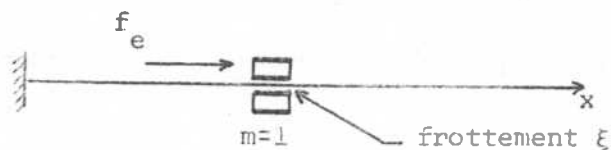


Figure 50

et l'équation différentielle :

$$x''(t) + \xi x'(t) = f_e(t) . \quad (11)$$

Nous donnerons simplement, pour la comparaison, les résultats concernant la réponse impulsionnelle, sans reprendre les développements littéraux.

Réponse impulsionnelle dans le cas du système continu :

$$x(n) = \frac{f_0}{\xi} \left(1 - e^{-\xi n} \right) , \quad (12)$$

dans le cas du système discontinu :

$$x(n) = \frac{f_0}{\xi} \left(1 - (1 - \xi)^{n+1} \right) . \quad (12')$$

Le facteur multiplicatif f_0/ξ est le même dans les deux expressions.

La comparaison doit alors porter sur les fonctions :

$$U(n) = u^n \quad \text{avec } u = e^{-\xi}$$

$$\text{et : } U'(n) = u'^{n+1} \quad \text{avec } u' = (1 - \xi) ;$$

$$\text{pour } n = 0, \quad U(0) = 1$$

$$U'(0) = (1 - \xi) .$$

Dans les applications numériques, ξ reste voisin de zéro donc $1 - \xi \neq 1$ et $U(0) \neq U'(0)$.

Lorsque n est grand devant 1, $n+1 \neq n$, donc $u'^{n+1} \neq u'^n$.

C'est alors, plus particulièrement $e^{-\xi}$ et $1 - \xi$ qu'il faut comparer.

Le développement limité de $e^{-\xi}$ est : $e^{-\xi} = 1 - \xi + \frac{\xi^2}{2!} + \dots$

donc, pour $\xi \neq 0$: $e^{-\xi} \neq 1 - \xi$.

Pour ξ non voisin de zéro :

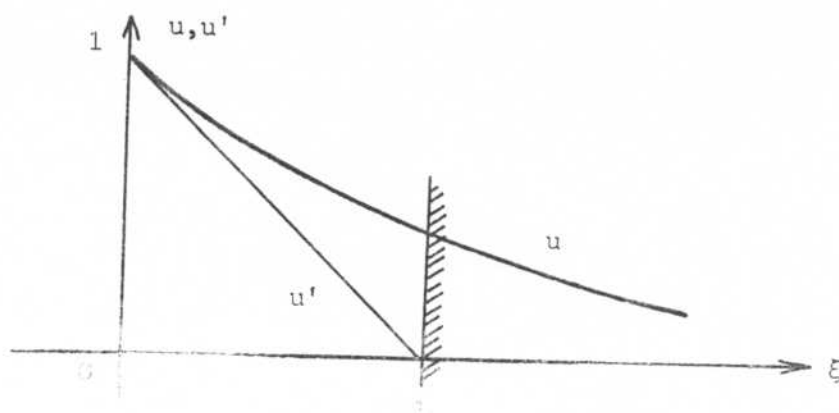
on remarque tout d'abord une valeur limite pour ξ :

en effet, pour $\xi > 1$, la suite u'^{n+1} est alternée.

On devra donc, pour rester dans le cadre d'une équivalence qualitative des deux modèles, prendre ξ dans le segment $[0, 1]$ pour le modèle discontinu, alors que ξ peut varier dans le segment $[0, +\infty)$ dans le système physique.

La comparaison de u et u' peut être présentée sous la forme d'un graphe.

FIGURE 51



Comme précédemment pour k , l'écart est nul pour $\xi = 0$ et augmente lorsque ξ augmente. Il est maximum pour $\xi = 1$.

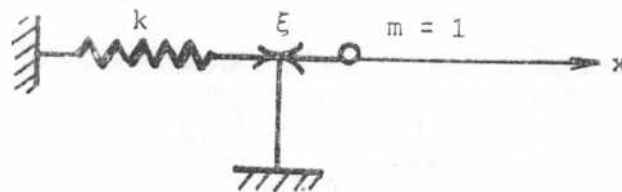
Les conclusions à tirer ici, sont du même ordre que dans le cas précédent ; Pour les valeurs faibles de ξ , l'algorithme est représentatif qualitativement et quantitativement, du modèle physique. Pour les valeurs de ξ proches de 1, l'algorithme peut être utilisé pour la production et le contrôle de signaux particuliers, la correspondance avec le modèle physique n'ayant pas de signification rigoureuse.

TROISIEME CAS : APPLICATION SIMULTANEE DES DEUX FORCES.

Nous donnerons seulement ici les expressions et le diagramme.

Modèle physique

FIGURE 52



Equation différentielle :

$$x''(t) + \xi x'(t) + k x(t) = f_e(t) \quad (13)$$

Réponse impulsionnelle :

Trois cas sont à distinguer en fonction des racines de l'équation caractéristique :

$$r^2 + \xi r + k = 0$$

$$1/ \Delta = \xi^2 - 4k > 0.$$

L'équation a deux racines réelles : r_1 et r_2 . Alors :

$$x(n) = \frac{f_0}{\sqrt{\Delta}} \left(e^{r_1 n} - e^{r_2 n} \right) \quad (14)$$

$$2/ \Delta = 0.$$

$$r_1 = r_2 = r = -\sqrt{k}.$$

$$x(n) = f_0 n e^{-\sqrt{k} n} \quad (15)$$

$\Delta < 0$. r_1 et r_2 sont imaginaires conjuguées.

$$-\frac{\xi}{2} n$$

$$\frac{\sqrt{4k - \xi^2}}{2} \quad (16)$$

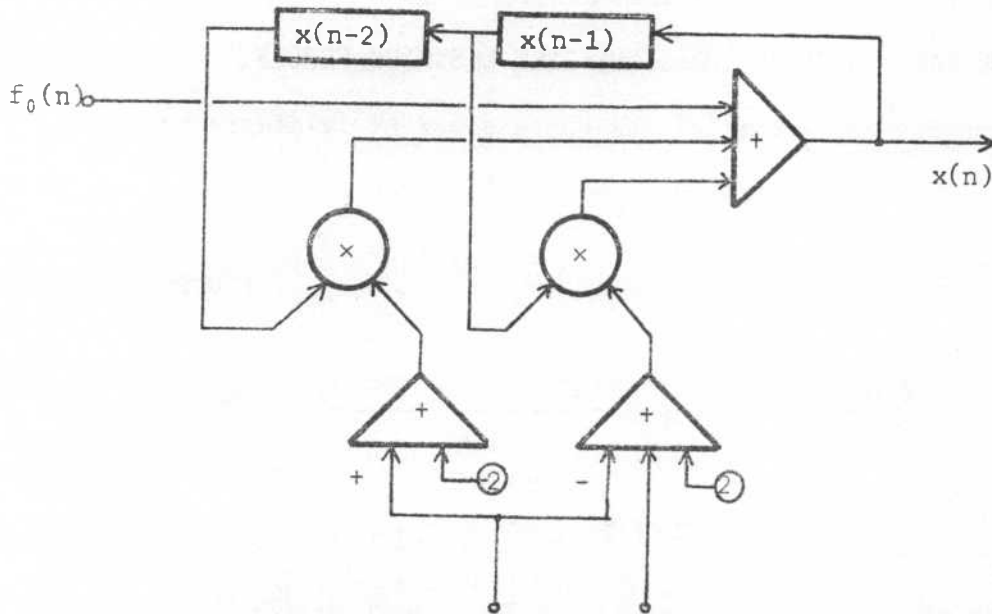
Système discontinu :

Equation aux différences :

$$x(n) = f_0(n) + (2 - k - \xi) x(n-1) - (1 - \xi) x(n-2) \quad . \quad (13')$$

Diagramme correspondant :

FIGURE 53



Réponse impulsionnelle :

Trois cas sont également à distinguer en fonction des racines de l'équation caractéristique :

$$r^2 - (2 - k - \xi)r + (1 - \xi) = 0 \quad .$$

$$1/ \Delta = (2 - \xi - k)^2 - 4(1 - \xi) > 0$$

l'équation a deux racines réelles : r_1 et r_2 . Alors :

$$x(n) = \frac{f_0}{\sqrt{\Delta}} \left(r_1^{n+1} - r_2^{n+1} \right) \quad . \quad (14')$$

$$2/ \Delta = 0$$

$$x(n) = (1 + n)f_0 (1 - \sqrt{k})^n \quad . \quad (15')$$

$$3/ \Delta < 0$$

$$x(n) = \frac{f_0}{\sin \alpha} \left(\sqrt{1 - \xi} \right)^n \sin(n+1)\alpha \quad (16')$$

$$\text{avec } \alpha \text{ tel que } \cos \alpha = \frac{2 - \xi - k_c}{2 \sqrt{1 - \xi}} \quad .$$

En conclusion, pour ces trois cas correspondant à la mise en oeuvre d'une cellule élémentaire, nous dirons simplement que l'équivalence et les divergences sont du même ordre que dans le cadre général du filtrage numérique comparé au filtrage analogique. Ceci permet d'envisager une utilisation de ce type d'algorithmes pour définir le formalisme de synthèse sonore.

Nous développerons maintenant une généralisation du principe mis en oeuvre ici et son application dans le cadre du programme CORDIS.

2.3.2.3. GENERALISATION

La mise en oeuvre algorithmique définissant le système, permettant de simuler d'une manière générale des structures mécaniques complexes composées de masses, de frottements, de raideurs, etc. s'appuie sur deux points :

- 1/ la définition d'algorithmes élémentaires permettant de représenter chaque fonction séparément ;
- 2/ la définition d'un mode de combinaison de ces algorithmes, image de la combinaison des éléments mécaniques.

a/ ALGORITHMES POUR LA REPRESENTATION DE CHAQUE ELEMENT

* La masse

Dans la présentation précédente, nous avons particularisé le problème en considérant la masse comme un système excité en entrée par la donnée d'une force $f_e(n)$ et donnant en sortie une réponse en position $x(n)$. On peut en fait considérer la situation symétrique où l'entrée serait la position $x(n)$, imposée par un système extérieur, lequel recevrait en réponse, de la part de la masse, une force $f^*(n)$.

Dans le cas de la masse seule et en réintroduisant les forces non réduites, celle-ci sera donc définie, selon l'utilisation qu'on en fera, par l'un ou l'autre des algorithmes décrits par les expressions :

$$x(n) = \frac{1}{m} F(n) + 2x(n-1) - x(n-2) \quad (17)$$

$$F^*(n) = -m \{ x(n) - 2x(n-1) + x(n-2) \} \quad (17^*)$$

* Elément de rappel : ressort sans masse de constante de raideur k

$$x(n) = \frac{1}{k} F(n) \quad (18)$$

$$F^*(n) = -k x(n) \quad (18^*)$$

* Elément de frottement ; constante de frottement ξ

$$x(n) = \frac{1}{\xi} F(n) \quad (19)$$

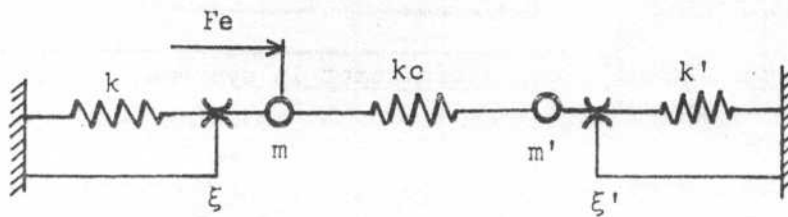
$$F^*(n) = -\xi \{ x(n) - x(n-1) \} \quad (19^*)$$

b/ MODE DE COMBINAISON

La description d'un système complexe, composé d'un ensemble de ces différents éléments peut être faite à l'aide de l'écriture du système d'équations correspondant à chaque élément.

Prenons un exemple : soit le système correspondant au modèle physique suivant :

FIGURE 54



où l'on prend $m = m' = 1$

Ce système comporte deux masses m et m' reliées au sol respectivement par des ressorts de constantes k et k' et des éléments de frottement de constantes z et z' . Les deux masses sont couplées entre elles par un ressort de constante k_c .

On applique une force extérieure $F_e(u)$ à la masse m et on recueille le signal $x(u)$ correspondant à la position de m à chaque instant.

Chacun des éléments en cause peut être représenté par une équation aux différences de la forme :

$$\begin{aligned} \text{ou} \quad (d) : x(n) &= F \left[F(n), x(n-1) \dots \right] \\ (d^*) : F^*(n) &= F^* \left[x(n), x(n-1) \dots \right] \end{aligned}$$

soit ici : (voir tableau page suivante)

Les points	Réponse en position F	Réponse en force F^*
	$x_m(n) = F_m(n) + 2x_m(n-1) - x_m(n-2)$	$F_m^*(n) = -x_m(n) + 2x_m(n-1) - x_m(n-2)$
	$x_{m'}(n) = F_{m'}(n) + 2x_{m'}(n-1) - x_{m'}(n-2)$	$F_{m'}^*(n) = -x_{m'}(n) + 2x_{m'}(n-1) - x_{m'}(n-2)$
	$x_k(n) = \frac{1}{k} F_k(n)$	$F_k^*(n) = -k x_k(n)$
	$x_{k'}(n) = \frac{1}{k'} F_{k'}(n)$	$F_{k'}^*(n) = -k' x_{k'}(n)$
	$x_\xi(n) = \frac{1}{\xi} F_\xi(n) + x_\xi(n-1)$	$F_\xi^*(n) = -\xi \left(x_\xi(n) - x_\xi(n-1) \right)$
	$x_{\xi'}(n) = \frac{1}{\xi'} F_{\xi'}(n) + x_{\xi'}(n-1)$	$F_{\xi'}^*(n) = -\xi' \left(x_{\xi'}(n) - x_{\xi'}(n-1) \right)$
	$l_{kc}(n) = \frac{1}{k_c} F_{kc}(n)$	$F_{kc}^*(n) = -k_c l_{kc}(n)$

L'action extérieure $F_e(n)$ et les liaisons imposées entre les éléments permettent alors d'écrire le système d'équations suivant :

$F_m(n)$ est la résultante des forces appliquées à la masse m :

$$F_m(n) = F_e(n) + F_k^*(n) + F_\xi^*(n) + F_{kc}^*(n)$$

d'où :

$$x_m(n) = F_e(n) + F_k^*(n) + F_\xi^*(u) + F_{kc}^*(n) + 2x_m(n-1) - x_m(u-2) \quad (20)$$

la longueur du ressort k est égale à $x_m(n)$, position de la masse m à l'instant n d'où :

$$F_k^*(n) = -kx_m(n) \quad (21)$$

Le frottement appliqué à la masse m, permet d'écrire par ailleurs :

$$x_\xi(n) = x_m(n), \text{ d'où :}$$

$$F_\xi^*(n) = -\xi \left[x_m(n) - s_m(n-1) \right] \quad (22)$$

$F_{m'}(n)$ est la résultante des forces appliquées à m' :

$$F_{m'}(n) = F_{k'}^*(n) + F_{\xi'}^*(n) - F_{kc}^*(n)$$

d'où :

$$x_{m'}(n) = F_{k'}^*(n) + F_{\xi'}^*(n) - F_{kc}^*(n) + 2x_{m'}(n-2) - x_{m'}(n-2) \quad (23)$$

la longueur du ressort k' est égale à $x_{m'}(n)$, d'où :

$$F_{k'}^*(n) = -k'x_{m'}(n) \quad (24)$$

Le frottement appliqué à m' permet d'écrire :

$$x_{\xi'}(n) = x_{m'}(n), \text{ d'où :}$$

$$F_{\xi'}^*(n) = -\xi' \left[x_{m'}(n) - x_{m'}(n-1) \right] \quad (25)$$

Enfin, la longueur l_{kc} du ressort kc est égale à

$$x_m(n) - x_{m'}(n), \text{ d'où :}$$

$$F_{kc}^*(n) = -kc \left[x_m(n) - x_{m'}(n) \right] \quad (26)$$

Pour résoudre ce système, il faudrait, en toute rigueur, le ramener au système ci-dessous en remplaçant dans (20) et (23) les forces par leurs expressions :

$$x_m(n) = F_e(n) - kx_m(n) - \xi \left[x_m(n) - x_m(n-1) \right] - k_c \left[x_m(n) - x_m(n) \right] \\ + 2x_m(n-1) - x_m(n-2)$$

$$x_{m'}(n) = -k'x_{m'}(n) - \xi' \left[x_{m'}(n) - x_{m'}(n-1) \right] + k_c \left[x_m(n) - x_{m'}(n) \right] \\ + 2x_{m'}(n-1) - x_{m'}(n-2)$$

soit :

$$x_m(n) = \frac{1}{1+k+\xi+k_c} \left[F_e(n) + (2+\xi)x_m(n-1) - x_m(n-2) + k_c x_{m'}(n) \right]$$

$$x_{m'}(n) = \frac{1}{1+k'+\xi'+k_c} \left[(2+\xi')x_{m'}(n-1) - x_{m'}(n-2) + k_c x_m(n) \right]$$

Ce qui contraint à définir un nouvel algorithme de calcul différent des précédents.

L'approximation utilisée plus haut pour simplifier l'algorithme dans le cas où l'on introduit les forces internes (de rappel ou de frottement), appliquées à la masse m , peut être généralisée. Cette méthode peut être définie précisément. Elle consiste, en fait, lorsque dans l'expression de l'algorithme, interviennent des variables (x ou F) dépendant d'autres modules, à prendre la valeur de ces variables pour l'indice $n-1$ calculées l'instant précédent. Ceci permet, quels que soient les éléments en cause, et leur combinaison, de conserver pour chacun la forme de son algorithme telle qu'elle est définie dans le cas où il est utilisé indépendamment.

Ceci revient à introduire une relation de causalité entre les entrées et la sortie d'un système, dans la mesure où cette dernière n'est disponible qu'après un certain temps correspondant au temps de calcul (qui conditionnera ici la période d'échantillonnage) après la donnée des premières.

Dans l'exemple précédent, l'application de cette méthode permet d'écrire le système d'équations sous la forme :

$$(20') \quad x_m(n) = F_e(n) + F_k^*(n-1) + F_\xi^*(n-1) + F_{kc}^*(n-1) + 2x_m(n-1) - x_m(n-2)$$

$$(21') \quad F_k^*(n) = -kx_m(n-1)$$

$$(22') \quad F_\xi^*(n) = -\xi[x_m(n-1) - x_m(n-2)]$$

$$(23') \quad x_{m'}(n) = F_{k'}^*(n-1) + F_{\xi'}^*(n-1) - F_{kc}^*(n-1) + 2x_{m'}(n-1) - x_{m'}(n-2)$$

$$(24') \quad F_{k'}^*(n) = -k'x_{m'}(n-1)$$

$$(25') \quad F_{\xi'}^*(n) = -\xi'[x_{m'}(n-1) - x_{m'}(n-2)]$$

$$(26') \quad F_{kc}^*(n) = -kc[x_m(n-1) - x_{m'}(n-1)]$$

La résolution littérale de ce système n'est pas fondamentalement plus aisée que dans le cas précédent. Par contre la mise en oeuvre algorithmique est notablement simplifiée et permet, comme on le verra plus bas, de définir un formalisme efficace.

Nous avons pu évaluer la validité de cette méthode en étudiant un système complexe de plusieurs oscillateurs hannoniques couplés en chaine par des ressorts, selon ce principe. Dans la chaine, représentant alors l'équivalent d'une corde vibrante, on a pu, en utilisant jusqu'à 256 cellules, mettre en évidence le phénomène de propagation de l'excitation appliquée à l'une d'entre elles, les noeuds et les ventres caractéristiques du mouvement oscillatoire d'une corde, ainsi que la superposition, dans la réponse impulsionnelle, de sinusoides de fréquences et d'amplitudes différentes, en nombre égal au nombre de cellules en cause. Le son obtenu n'est pas harmonique car le rapport des fréquences ne tend vers des valeurs entières que lorsque le nombre de cellules devient très grand.

L'expression de l'évolution d'une des cellules (indice i), dans une chaine où le nombre de cellules devient très grand, sans coefficients de frottement, reliée aux deux extrémités à un point fixe et excitée par une impulsion de force, s'écrit :

$$\mu_{i,n} = \sum_{s=1}^r \sin i \frac{s\pi}{r+1} [Cs \cos \alpha_s n + Ds \sin \alpha_s n]$$

où i est le numéro de la cellule dans la chaine

n le numéro de l'échantillon (instant $t = nTe$)

r le nombre de cellules dans la chaine

Cs et Ds des constantes dépendant de la masse, de la raideur et du coefficient de frottement pour chaque cellule

α_s une pulsation réduite définie par $\cos \alpha_s = 1 - 2k \sin^2 \frac{s\pi}{(r+1)^2}$

Dans le cas d'un système continu dans le temps constitué d'une chaîne de masses reliées par des ressorts d'une manière analogue, on obtient :

$$u_i(t) = \sum_{s=1}^r \sin i \frac{s\pi}{r+1} (C_s \cos \omega_s t + D_s \sin \omega_s t)$$

Sur le plan purement qualitatif, les calculs et les essais effectués montrent que la validité de cette méthode est assurée dans le domaine correspondant aux applications envisagées.

Sur le plan quantitatif, la complexité des calculs exclue pour l'instant une étude théorique très générale. Celle-ci ne pourra être faite qu'après une expérimentation pratique suffisante de ces premières bases.

Ce procédé nous permet, pour l'instant, et c'était bien l'objectif recherché, de décrire d'une manière simple, une structure complexe composée d'éléments de base, en combinant les algorithmes correspondant à chacun d'eux.

On est alors en mesure de traduire sous forme de diagramme, comme on a pu le faire dans le cas de MUSIC V, toute structure correspondant à un mécanisme vibrant.

Pour l'exemple pris plus haut, on aurait ainsi le diagramme page 82. (Figures 53 et 56).

On retrouve alors ici, l'idée générale du mode opératoire avec :

- * La préstructuration correspondant au choix des modules et de leurs interconnexions
- * Les différents jeux possibles :
 - par excitation énergétique à l'aide de l'entrée de force F_e
 - par modification de paramètres de la structure correspondant aux entrées de contrôle m, m', k, ξ, k', ξ' et k_c .

La signification des diverses commandes est cependant plus concrète que dans le cas de MUSIC V et, à ce titre, permettra une expérimentation directe où l'analyse acoustique préalable est remplacée par une observation des organes mécaniques en cause. Il restera à montrer qu'il s'agit là d'une approche pratique, à terme plus efficace. Ceci reste encore, évidemment, une hypothèse que nous ne pourrions vérifier qu'à l'aide du dispositif global sous sa forme suffisamment évoluée et fonctionnant en temps réel.

On peut encore, ici, formuler plusieurs remarques permettant d'établir sur quelques éléments, une comparaison avec les bases de MUSIC V. Dans la description de la structure, on retrouve le même aspect d'arborescence "ascendante" ou "descendante" dans la mesure où, comme pour MUSIC V, chaque sortie peut être connectée à plusieurs entrées différentes (voir schéma page 83).

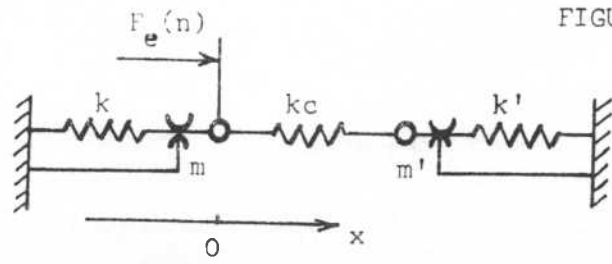


FIGURE 55

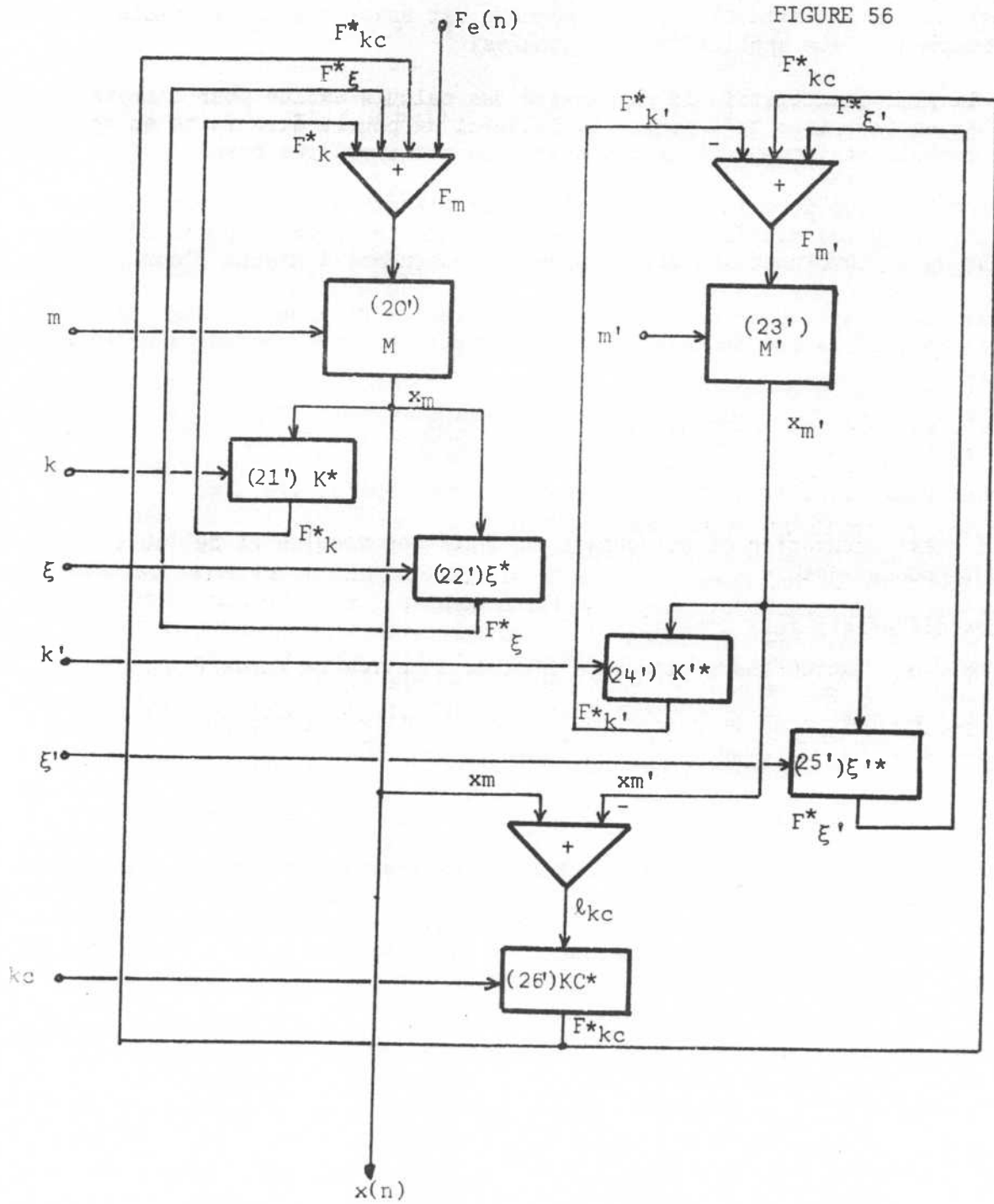


FIGURE 56

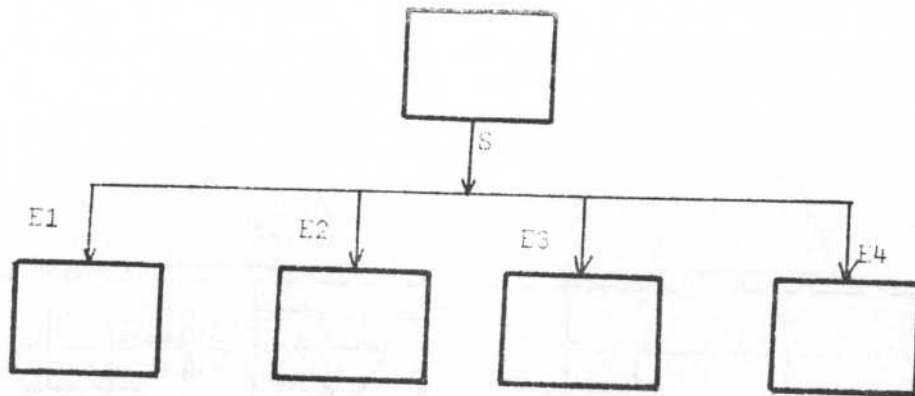


Figure 57

et chaque entrée peut recevoir, par l'intermédiaire d'un additionneur, plusieurs sorties différentes :

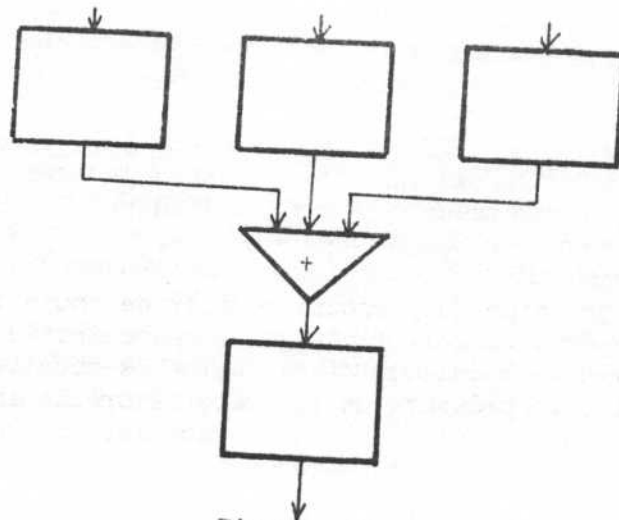


Figure 58

Dependant il existe une différence essentielle sur l'aspect séquentiel dans l'un et dans l'autre cas. Dans MUSSE V, il n'est pas possible, en effet, du fait du principe de calcul des échantillons relatifs à chaque module, (par blocs de 512), de réaliser un bouclage d'un module sur lui-même ou d'une chaîne de modules sur elle-même. Ainsi, la chaîne des modules est hiérarchisée et, à chaque niveau, l'ensemble des signaux doit être élaboré entièrement (par blocs de 512 échantillons) avant que le calcul puisse passer, dans un sens unique, au niveau suivant.

soit par exemple la structure simple suivante :

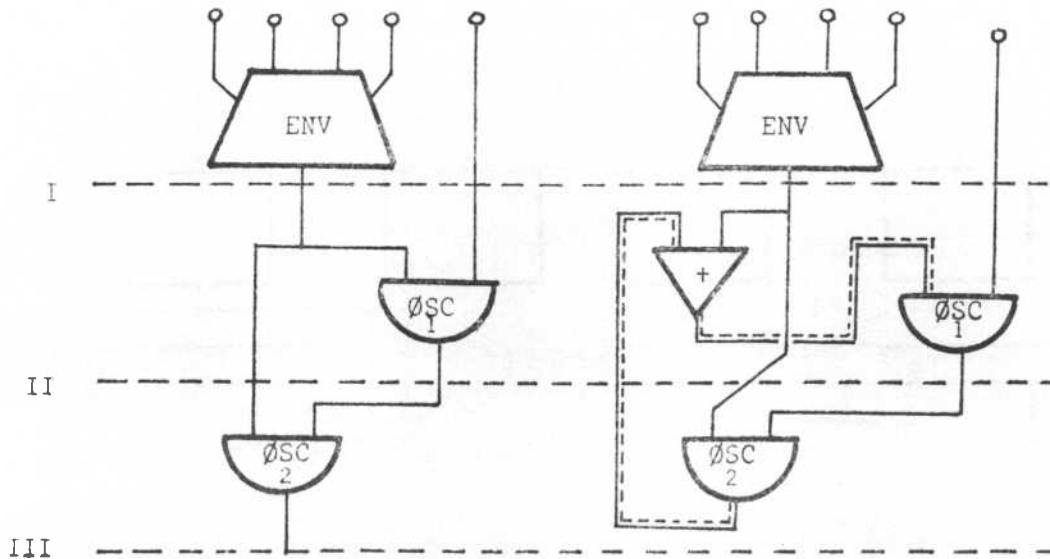


Figure 1

Figure 2

permettant la modulation de la fréquence de l'oscillateur 2 par l'oscillateur 1 selon un taux donné par le générateur d'enveloppe qui détermine également l'enveloppe finale du signal.

Les trois niveaux, I, II et III qui apparaissent ici, ne peuvent être abordés que successivement. On ne pourrait envisager par exemple, si cela présentait un intérêt, une rétroaction de l'oscillateur 2 sur l'oscillateur 1 (figure 2).

Dans notre cas, le principe du parcours complet de toute la structure pour le calcul de chaque échantillon, ainsi que l'approximation introduite, permettent le bouclage d'un module ou d'une chaîne de modules sur eux-mêmes. On pourra ainsi, si cela présente un intérêt, naturellement, moduler la constante de raideur d'une cellule (oscillateur harmonique) par son signal de sortie propre éventuellement transformé par un module intermédiaire.

La forme de la structure peut être en fait plus générale : L'aspect d'arborescence du diagramme d'instrument (cf. page 16) fait place à une forme en réseau constitué de mailles (schéma ci-dessous).

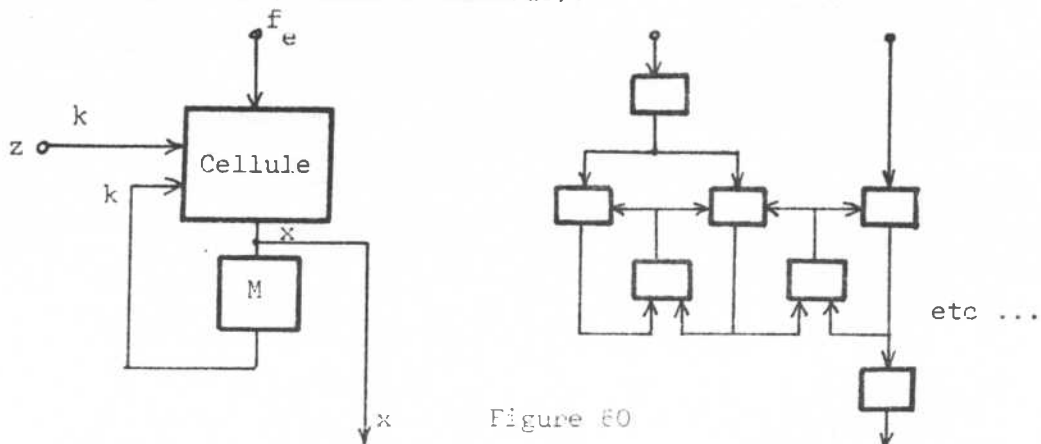


Figure 60

(Remarque : nous avons fait abstraction, dans les deux cas, des coefficients multiplicatifs nécessaires pour le cadrage des variables de sortie lorsqu'elles sont utilisées comme variables d'entrée d'un autre module).

La mise en oeuvre d'un système général fondé sur les principes que nous venons de décrire peut être envisagée, soit sur un plan logiciel où chaque algorithme est un sous-programme écrit en langage machine, soit sur un plan matériel, où chaque module correspondrait à un circuit approprié.

On peut évoquer dès maintenant le problème de l'obtention en temps réel des signaux, posé plusieurs fois ici. Il est déterminé par les considérations suivantes :

Sur le plan logiciel. Le temps nécessaire au calcul d'un échantillon de sortie est la somme :

- des temps d'acquisition sur les différentes entrées (d'excitation et de contrôle)
- des temps de calcul propres à chaque module
- du temps nécessaire à la conversion en sortie.

Sur le plan matériel. On peut s'affranchir, et c'est là le premier intérêt du système câblé, de l'aspect séquentiel qui impose, dans le cas logiciel le fonctionnement d'un seul module à la fois. L'utilisation en parallèle de plusieurs modules spécialisés, outre le temps gagné par le fait de cette spécialisation, permettra d'obtenir un temps de calcul non plus égal à la somme des temps nécessaires à chaque module, mais simplement au plus grand de ceux-là.

Le compromis procèdera du choix entre la multiplication physique des modules dont l'incidence sur le plan purement du coût est évidente, et le multiple-xage sur un même module physique pour lui faire jouer séquentiellement le rôle de plusieurs modules dans des conditions différentes.

Dans la préfiguration logicielle du système, que nous aborderons maintenant au travers de la description du programme CORDIS, c'est, bien évidemment sur le premier plan que nous nous sommes situés.

2.3.3. Le programme CORDIS

La réalisation de ce système logiciel a été envisagée selon un double objectif : Mettre en oeuvre en langage machine (assembleur) les algorithmes de base décrits précédemment pour leur expérimentation élémentaire, et développer un premier contexte d'utilisation proche de l'objectif initial d'une expérimentation instrumentale.

Cette attitude permet à la fois d'évaluer le fonctionnement des modules de manière à les définir plus précisément avant leur construction matérielle, mais également d'évaluer leur intérêt plus globalement et, à la limite, de déterminer les directions dans lesquelles il faut les développer ou même quels autres modules de base il faut faire intervenir pour avoir un système suffisamment général.

Nous nous sommes alors, plus particulièrement, attachés aux aspects suivants :

a/

* Etude des sous-programmes correspondants aux modules

Dans un premier temps, nous avons simplement mis en oeuvre la cellule correspondant à un oscillateur harmonique, soit à une masse reliée à un point fixe par un ressort et un frottement.

* Etude des modes d'acquisition des données de contrôle par les convertisseurs analogique/numérique d'entrée et des sorties par les convertisseurs numérique/analogique.

b/ Etude d'un premier niveau de langage pour décrire une structure de complexité quelconque, permettant en particulier l'utilisation simultanée de plusieurs cellules interconnectées.

c/ Etude des aspects propres au mode opératoire incluant notamment :

* L'utilisation pour le contrôle, des organes d'entrée gestuels décrits précédemment.

* L'articulation entre l'utilisation du système en temps réel, sur des structures simples, et l'utilisation en temps différé sur des structures plus complexes contrôlées par des entrées élaborées et enregistrées au cours de l'utilisation en temps réel.

* Une première approche du problème de la mémorisation appliquée aux données gestuelles. Ce point est corrélié au précédent.

Le programme CORDIS est partagé en trois "PASSES" dont la description nous permettra maintenant d'évoquer tous les points traités dans ce travail.

2.3.3.1. PREMIERE "PASSE" LE PROGRAMME CORDS 1

Son fonctionnement a lieu exclusivement en temps réel. Notons tout de suite, cependant, qu'on est loin ici, des systèmes de synthèse sonore en temps réel. Il ne s'agit en fait que d'une approche très frustrante, puisqu'il n'est fait appel à aucun dispositif matériel spécialisé. La fréquence d'échantillonnage, liée au temps de calcul pour chaque échantillon, n'excède pas 1kHz, dans le meilleur des cas. Ceci le rend cependant parfaitement opérationnel dans le cas où on l'utilise pour la simulation des systèmes mécaniques associés au coupleur gestuel interactif.

Le rôle de ce programme est de permettre la première expérimentation d'une structure vibrante, reliée aux entrées de contrôle et aux sorties, que l'on peut observer soit directement à l'aide de l'image d'un oscilloscope, soit en l'utilisant pour contrôler un synthétiseur analogique donnant alors une image sonore du processus.

Nous le décrivons selon les trois points suivants :

- * Description des modules de base.
- * Description de la structure globale du programme.
Fonctions particulières.
- * Mode d'utilisation : méthode de description de la structure vibrante.

a/ MODULES DE BASE

a.1/

Le module principal est ici la cellule correspondant à l'oscillateur harmonique excité par une force d'entrée $F_e(n)$ et fournissant à chaque instant deux grandeurs correspondant à son état cinétique, soit, en fait, les deux derniers échantillons calculés, $x(n)$ et $x(n-1)$ d'où l'on peut extraire la position $\{x(n)\}$ et la vitesse $\{x(n) - x(n-1)\}$.

Il est réalisé par un sous-programme : CELULE, écrit en langage assembleur, correspondant au calcul suivant :

$$X(n) = F_e(n) + (2-k-\xi) x(n-1) - (1-\xi) x(n-2)$$

où k représente une constante de raideur
et ξ une constante de frottement.

Les échantillons et les paramètres de contrôle sont représentés par des nombres réels décrits en format "Flottant" sur deux mots de 16 bits.

Le programme CELULE effectue les opérations suivantes :

Un certain nombre de cases mémoires sont réservées et contiennent :

- F : la valeur de la force extérieure à l'instant considéré.
- V : la valeur de l'échantillon $X(n-1)$ calculée précédemment.
- W : la valeur de l'échantillon $X(n-2)$ calculée deux coups avant.
- K : la valeur de la constante de raideur k à l'instant considéré.
- Z : la valeur de la constante de frottement ξ à l'instant considéré.

Programme

1. Calcul de $2-K-Z = A$
2. Calcul de $A \times V = P1$

3. Calcul de $-(1-Z) = B$
4. Calcul de $B \times W = P2$
5. Calcul de $P1 + P2 = SP$
6. Calcul de $F + SP$
7. Chargement de W par V
8. Chargement de V par $F + SP$

Le temps correspondant à ces huit opérations est de l'ordre de 1 ms.

Les opérations (multiplication et addition) sont effectuées directement par les modules spéciaux du processeur LSI 11 dans le format "flottant" sur deux mots de 16 bits.

Dans le système matériel ultérieur, elles seront prises en charge par des multiplieurs et additionneurs rapides (temps pour une multiplication : ~ 200 ns) en format "entier" sur 24 bits.

L'utilisation de ce sous programme peut être faite, typiquement de la façon suivante :

Chargement de F par l'entrée de contrôle connectée à un capteur de force.
Chargement de K et Z par des constantes déterminées par le programme d'appel.
Sortie de V par un convertisseur numérique analogique.

Les valeurs initiales de V et W sont fixées à 0.

Le signal de sortie est nul jusqu'au moment où l'on applique à l'entrée F une valeur non nulle.

Le système simule alors un oscillateur harmonique dont les paramètres sont constants.

Cependant, dans sa forme présente, cet algorithme ne différencie pas les signaux "lents" des signaux "rapides".

On peut en fait considérer indifféremment F , V , W , K et Z comme des entrées "rapides".

Pour l'entrée F , le système se comporte alors comme un filtre du deuxième ordre.

Pour K et Z , le contrôle par des signaux lents correspondra à une modulation pendant le fonctionnement, des paramètres de l'oscillateur harmonique, agissant sur la fréquence, l'amplitude et le temps d'amortissement de la vibration. On pourra réaliser ce contrôle en associant les entrées K et Z à un système d'accès tel que capteur de force ou déplacement ou la combinaison des deux.

La possibilité de commander K et Z par des signaux rapides permet d'envisager des processus analogues à la modulation de fréquence dont on connaît l'intérêt, dans l'usage qui a pu en être fait à l'aide de MUSIC V. Remarquons cependant qu'une modulation de K ne correspond pas à une modulation pure de fréquence puisque l'amplitude du signal varie également avec K .

L'utilisation de V et W comme entrées est plus délicat. En effet, leur contrôle au même rythme que le rythme de calcul n'a pas de sens ni d'intérêt puisque cela revient à imposer leur évolution indépendamment de l'algorithme.

Le contrôle lent doit être abordé d'une manière particulière. En effet, tout nouveau couple de valeur pour V et W impose de nouvelles conditions initiales au processus. Ce qui revient à interrompre le processus en cours pour imposer le déroulement selon de nouvelles conditions énergétiques.

Pour une force d'entrée $F_e(n)$ nulle et constante, imposer, par exemple, à V et W une même valeur, non nulle, revient à faire démarrer le processus avec une élongation donnée et une vitesse initiale nulle.

Le mode d'excitation est envisageable et pourra, dans le cas de référence, être associé à un capteur de position.

a.2/ Modules d'acquisition et de sortie

Nous disposons sur le système LSI 11 de 8 convertisseurs analogique/numérique et de 4 convertisseurs numérique/analogique, contrôlables par programme.

Nous les utilisons ici pour effectuer l'acquisition des tensions analogiques issues des divers dispositifs de contrôle, et pour la sortie des signaux sonores.

Spécifications

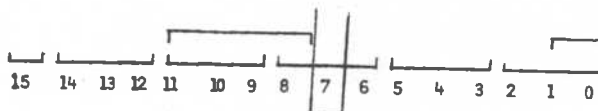
Convertisseurs d'entrée :

Il s'agit en fait d'un seul convertisseur 12 bits avec un circuit d'échantillonnage et maintien, associé à un multiplexeur permettant d'utiliser 8 entrées différentielles indépendantes.

La conversion est commandée soit par le programme, soit par l'horloge programmable du système LSI 11, soit par un signal extérieur. Le contrôle est effectué par l'intermédiaire d'un registre CSR (Control/Status Register), l'entrée convertie est disponible et le code numérique sur 12 bits est :

+ 5.12 V		1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1
0 V		1 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
- 5.12 V		0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0

Le registre CSR est organisé de la manière suivante :



Bits 11 à 8 : Sélection de l'entrée

entrée 0 :	<u>0 0 0 0</u>	entrée 3 :	<u>1 0 0</u>
entrée 1 :	<u>0 0 0 1</u>	entrée 4 :	<u>1 0 1</u>
entrée 2 :	<u>0 0 1 1</u>	etc.	

Bit 0 : Lorsqu'il est mis à 1 par le programme, l'acquisition et la conversion commencent.

Bit 7 : Il est mis à 1 par le système de contrôle lorsque la conversion est terminée et le nombre disponible dans le registre DBR.

Il peut être lu et remis à 0 par le programme.

Les autres bits sont également utilisés pour divers contrôles. Nous ne les utilisons pas dans les programmes mis en oeuvre ici.

Le temps maximum pour l'acquisition et la conversion est de l'ordre de 50 μ s.

Les modules d'acquisition sont, dans notre programme, des sous-programmes AD0 ... AD7 qui effectuent les opérations suivantes.

AD0 : acquisition sur la voie d'entrée 0
conversion du nombre entier sur 12 bits (cadrés à droite) en nombre réel en format "Flottant", sur deux mots de 16 bits.
chargement de deux "mots mémoire" consécutifs repérés par l'étiquette EXH0.

La correspondance est la suivante :

<u>signal d'entrée</u>	<u>nombre réel dans EXH0</u>
+ 5,12 V	+ 32768
0 V	0
- 5,12 V	- 32768

Les opérations sont identiques avec AD1, ...AD7 associés respectivement aux entrées 1, ...7 et qui chargent les "mots mémoires" repérés par les étiquettes EXH1 à EXH7.

Convertisseurs de sortie :

Il s'agit cette fois de quatre convertisseurs indépendants, fonctionnant également sur 12 bits.

On dispose en effet de quatre registres de données distincts, d'adresses différentes, qui peuvent être chargés par le programme.

Le nombre disponible dans un registre est converti en un temps maximum de 8 μ s, en une tension continue, maintenue constante jusqu'à un nouveau chargement. La correspondance est :

<u>Nombre sur 12 bits</u>	<u>Tension de sortie</u>
<u>1 1 1</u> , <u>1 1 1</u> , <u>1 1 1</u> , <u>1 1 1</u>	+ 5,12 V
<u>1 0 0</u> , <u>0 0 0</u> , <u>0 0 0</u> , <u>0 0 0</u>	0 V
<u>0 0 0</u> , <u>0 0 0</u> , <u>0 0 0</u> , <u>0 0 0</u>	- 5,12 V

Les modules DA0, DA1 ... DA3, utilisés dans le programme sont des sous-routines effectuant les opérations suivantes :

- DA0 : - Conversion du nombre en format flottant disposé dans le couple de mot mémoire réservé à l'adresse SXH0, en format entier sur 12 bits cadré à droite.
- Sortie du nombre entier sur le convertisseur 0 (voie de sortie 0).
- DA1 ... DA3 : Effectuent les mêmes opérations avec SXH1 ... SXH3 et les voies de sortie 1 à 3.

a.3/ Modules "Adaptateurs"

De manière à pouvoir établir toutes les interconnexions possibles entre les diverses entrées et sorties des modules, il est nécessaire de disposer d'un module de calibrage des divers signaux. Le module HH1 élaboré ici, est un sous-programme établissant la correspondance entre deux plages de variations :

en entrée : les valeurs extrêmes GV et PV sont données comme des constantes dans le programme d'appel.

en sortie : la plage de variation est ± 32768 .

La valeur H_e à "adapter", est en format flottant sur 2 mots de 16 bits. Elle est placée dans le couple de mots mémoire à l'adresse H. L'appel au module HH1 effectue alors la correspondance :

$$\begin{array}{ll} + 32768 & \longrightarrow \text{GV} \\ - 32768 & \longrightarrow \text{PV} \end{array}$$

de la manière suivante :

$$H_s = \frac{GV + PV}{2} + \frac{GV - PV}{32768} \times H_e$$

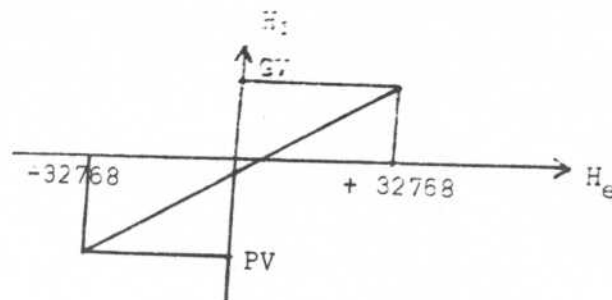


FIGURE 61

Le résultat se substitue à H_e dans le couple de mémoire H.

Pour chacun de ces modules, on peut définir un symbole graphique qui permettra de décrire par des diagrammes les structures définies.

CELULE

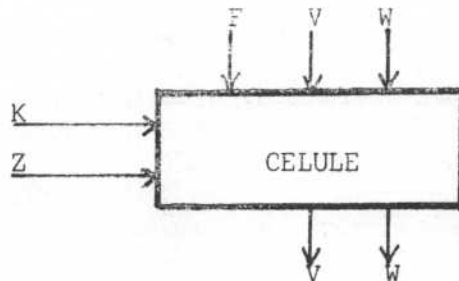


FIGURE 62

AD0 ... 7

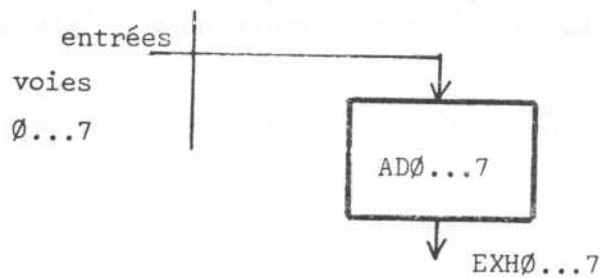


FIGURE 63

DA0 ... 3

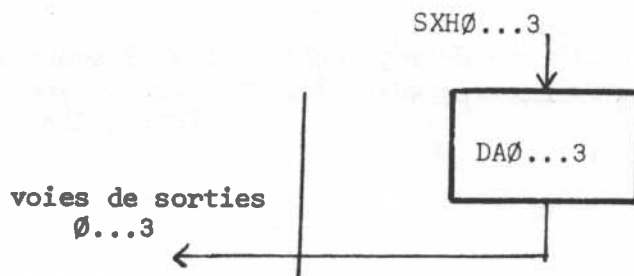


FIGURE 64

HH1

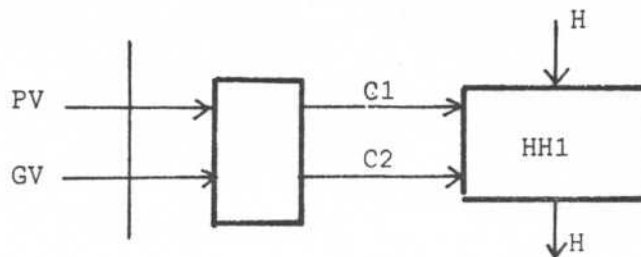


FIGURE 65

a.4/

On peut y ajouter un module additionneur et un module soustracteur qui permettront une utilisation générale des précédents :

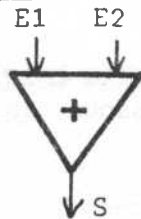
ADDI :où $S = E1 + E2$

FIGURE 66

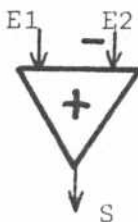
SOUS :où $S = E1 - E2$

FIGURE 67

b/ STRUCTURE DU PROGRAMME CORDS 1

L'organigramme général est donné par la figure 68 page 95.

Le programme est constitué essentiellement :

- d'un programme d'appel CORPS A
- de la subroutine de préstructuration quantitative PSQN
- de la subroutine principale CORDIS
- de subroutines spéciales :
 - . pour la mesure ou la donnée de la fréquence de calcul : FRECA
 - . pour le dialogue avec l'utilisateur : WDYW

L'appel à PSQN, au lancement du programme permet à l'utilisateur de définir toutes les constantes intervenant dans le processus.

La structure pourra être construite à partir des 8 convertisseurs d'entrée, des 4 convertisseurs de sortie, de 8 adaptateurs indépendants HH1Ø ... 7 et de 32 cellules : CELULE Ø ... 31.

L'utilisation des adaptateurs HH1n impose, pour chacun, la donnée de deux constantes GVn et PVn. Pour chacune des cellules, on peut fixer certaines entrées comme F, K, Z.

Le sous-programme PSQN demande à l'utilisateur l'ensemble de ces constantes.

Appel de CORDIS :

La structure mécanique étudiée est décrite par une suite d'instructions (nous y reviendrons en particulier au paragraphe C, ci-dessous) insérée dans une boucle de calcul.

Le sous-programme CORDIS est en fait une boucle qui effectue :

- l'acquisition des entrées nécessaires sur les voies déterminées
- le calcul proprement-dit de l'échantillon (ou des échantillons s'il y a plusieurs sorties)
- la sortie de (ou des) l'échantillon(s) sur la (ou les) voie(s) de sorties voulues.

Le principe du "temps-réel" s'appuie ici simplement sur le fait que les échantillons du signal de sortie sont envoyés aux convertisseurs dès qu'ils sont calculés.

Pour des structures très simples, le calcul peut être fait en 1ms, ce qui donne une fréquence de sortie de 1KHz. Dans les cas plus complexes, le temps de calcul peut être beaucoup plus long et la fréquence de calcul peut diminuer jusqu'à 50 Hz.

La rapidité des signaux obtenus n'est pas suffisante pour une observation acoustique. (Ils peuvent toutefois contrôler l'évolution des signaux d'un synthétiseur analogique). Cependant, pour leur observation visuelle à l'aide d'un oscilloscope, on a, par ces essais, une première approche du comportement du mécanisme.

C'est principalement pour cette raison que nous avons développé ce premier programme, qui est complété par le programme CORDS 3 prévu pour un fonctionnement en temps différé à partir des mêmes structures.

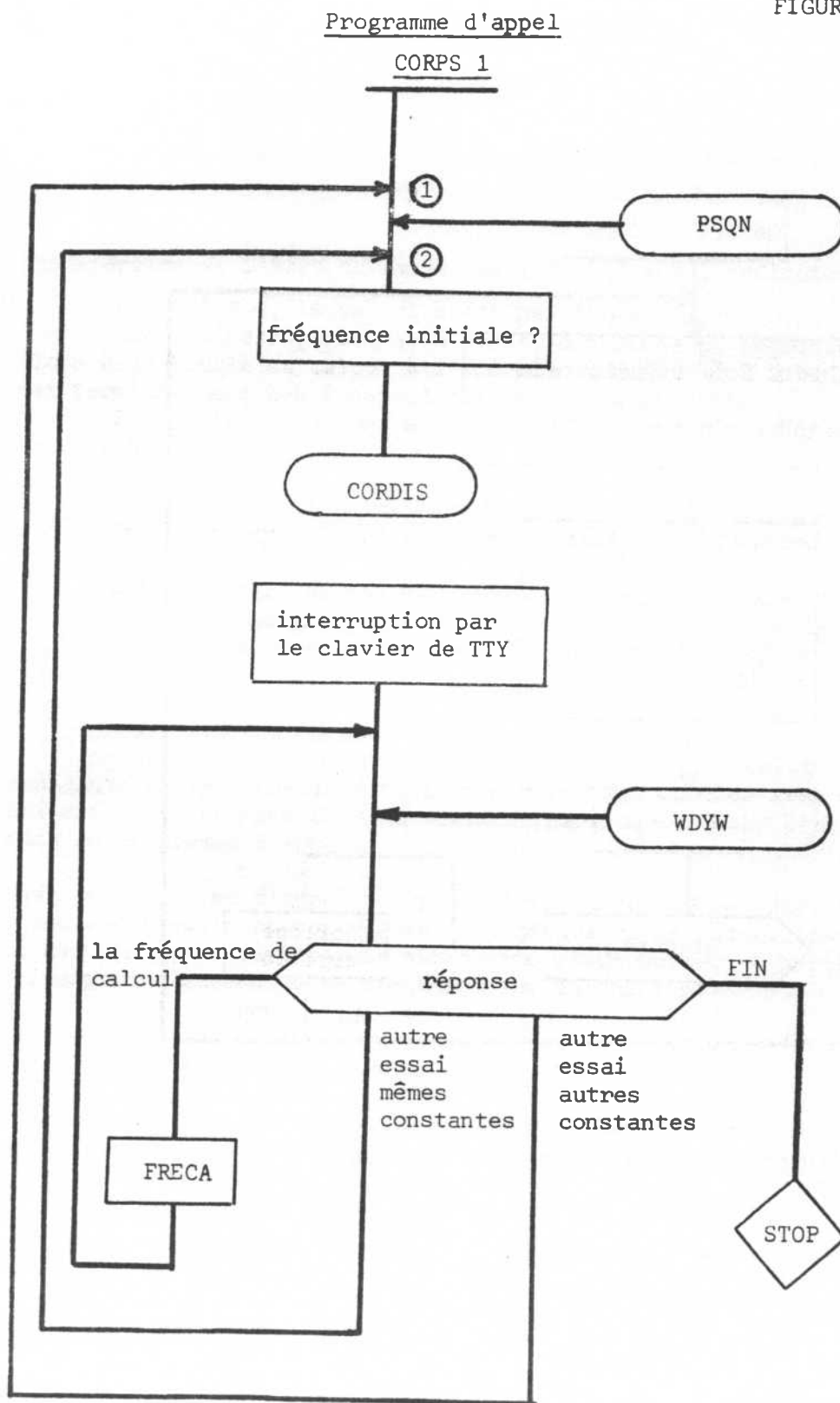
La boucle de calcul, dans CORDIS, est parcourue à une vitesse qui dépend de la complexité de la structure et que l'on ne peut prévoir avec précision. Par ailleurs, pour une même structure, le temps de calcul n'est pas constant d'un échantillon à l'autre.

Il a donc été nécessaire d'élaborer un système de synchronisation permettant la sortie des échantillons à intervalles réguliers, associé à un dispositif de régulation adaptant la période d'échantillonnage à la durée maximale du calcul.

Dans le sous-programme CORDIS, on fait donc appel, pour synchroniser le calcul, à l'horloge programmable du LSI 11.

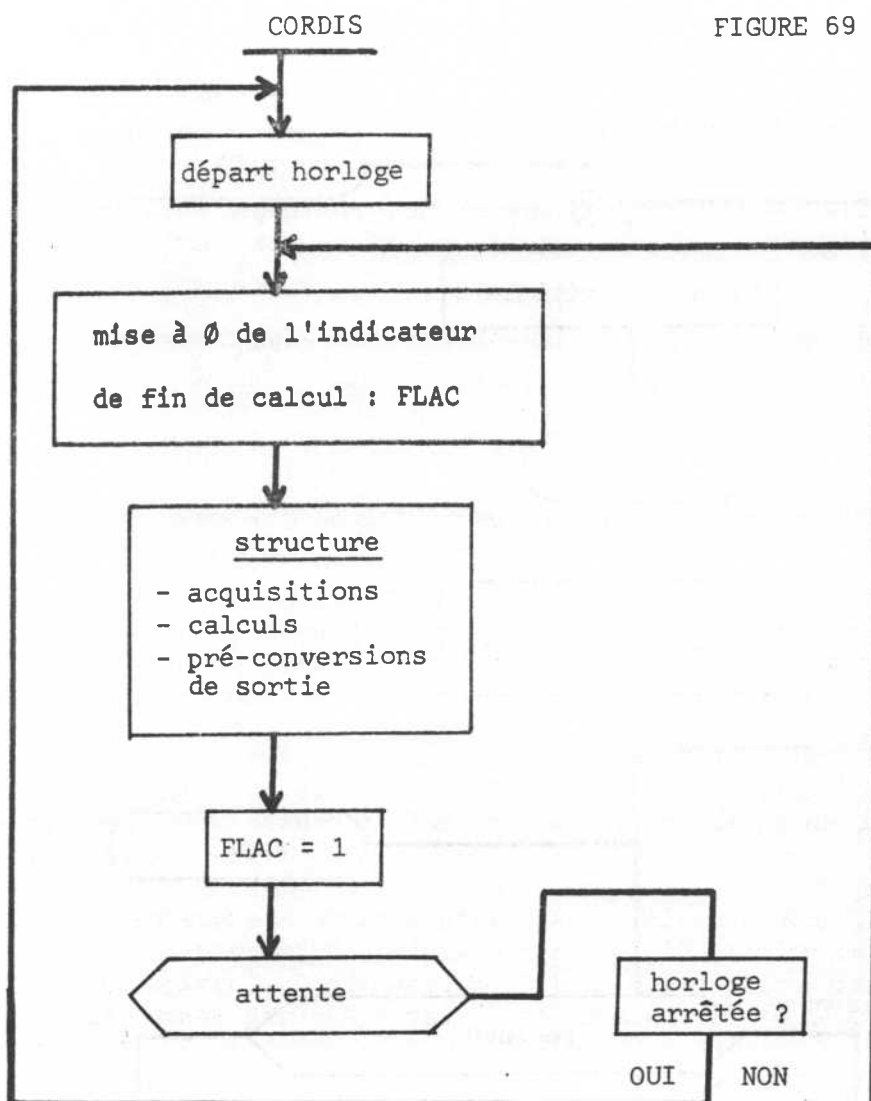
ORGANIGRAMME DU PROGRAMME CORDS 1

FIGURE 68

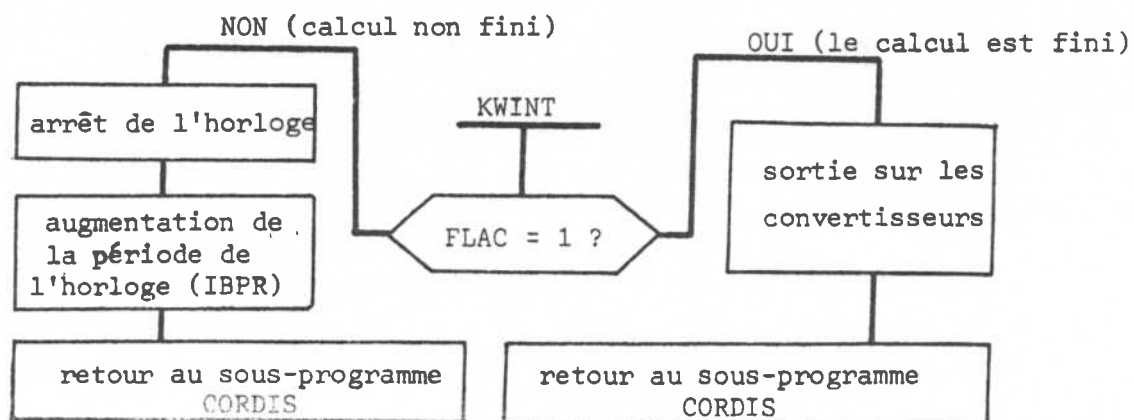


Organigramme du sous-programme CORDIS

FIGURE 69



Programme d'interruption par l'horloge programmée



Fonctionnement

Au premier tour de boucle, l'horloge programmable est déclenchée avec une fréquence maximum de $FC = 10\text{kHz}$.

Le calcul commence. L'horloge interrompt alors la boucle de calcul au bout d'un temps égal à la période $\frac{1}{FC}$, et introduit dans le programme d'interruption KWINT.

La détection de l'état du calcul se fait grâce à l'indicateur FLAC :

- Si $FLAC = 0$, le calcul n'est pas fini.

Alors l'horloge est arrêtée et sa période $\frac{1}{FC}$ augmentée. On retourne alors à la boucle de calcul à l'endroit où elle a été interrompue. Le calcul est terminé, mais les échantillons ne sont pas sortis.

La boucle se referme en amont du démarrage de l'horloge. Le processus se reproduit alors.

- Si $FLAC = 1$, le calcul est fini.

Une instruction permet alors l'attente de l'interruption par l'horloge au bout du temps $\frac{1}{FC}$.

Dans ce cas, les échantillons sont envoyés aux convertisseurs de sortie.

Le retour au programme CORDIS se fait alors de telle manière que la boucle se referme en aval du démarrage de l'horloge. Le processus se reproduit identiquement.

Lorsque $\frac{1}{FC}$ est \geq au temps maximum de calcul, l'horloge compte à fréquence constante et les échantillons sont envoyés aux sorties avec cette même fréquence qui est alors chargée dans un registre particulier pour être éventuellement lue dans le programme d'appel.

Dans le programme d'appel, on peut fixer la fréquence initiale de l'horloge directement égale ou supérieure à la fréquence de calcul, dans le cas où celle-ci est connue à l'avance. La sous-routine FRECA permet, à partir du programme principal, d'écrire cette fréquence sur la télétype.

Un dispositif d'interruption permet, en tapant la touche "X" sur le clavier de la télétype, d'arrêter le calcul en cours.

On retourne, dans ce cas, au programme d'appel qui appelle à son tour le sous-programme de "dialogue" WDYW.

Le sous-programme WDYW demande alors si l'on désire :

- connaître la fréquence de calcul
- effectuer un autre essai sans changer les constantes fixées dans PSQN
- changer ces constantes
- arrêter le programme.

c/ MODE OPERATOIRE POUR LA DETERMINATION DE LA STRUCTURE SIMULEE

Nous le décrirons à partir de l'exemple simple de deux oscillateurs harmoniques dont le premier module la constante de raideur du second.

c.1/ Diagramme

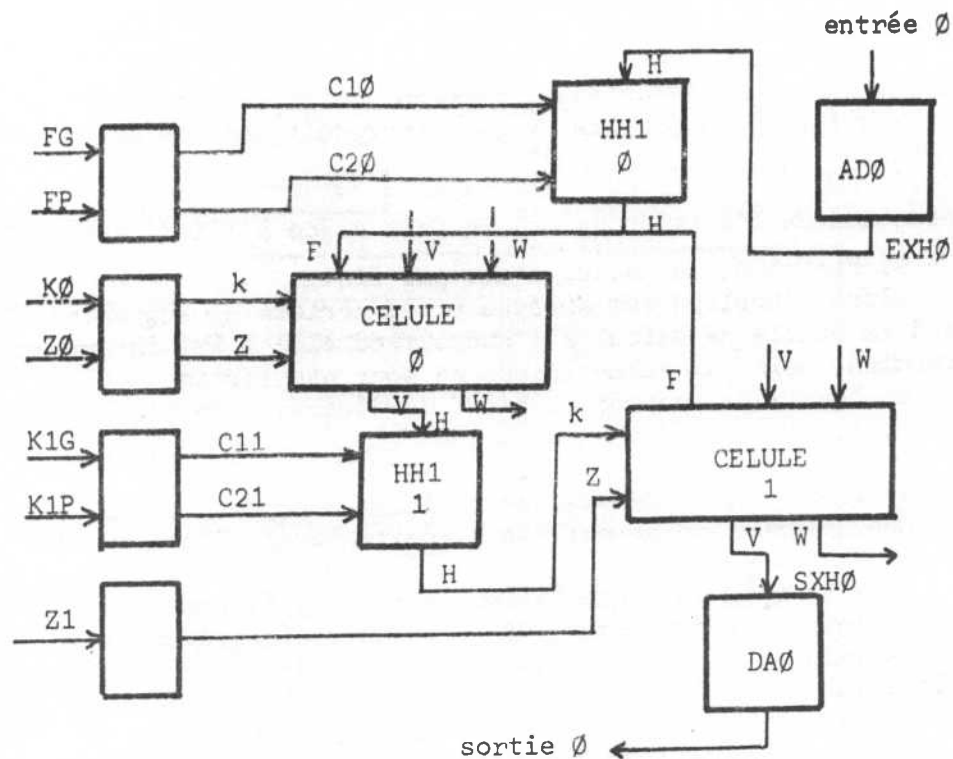


FIGURE 71

Boucle de Calcul

Cette structure met en oeuvre :

- le convertisseur d'entrée ADØ : entrée analogique sur la voie Ø, échantillon acquis et converti en format flottant disponible dans le "buffer" EXHØ (Entrée extérieure "Haut-débit")
 - deux adaptateurs HH1Ø et HH11 dont les constantes sont, respectivement, C1Ø, C2Ø et C11, C21
 - deux cellules, CELULE Ø et CELULE 1 attaquées simultanément par la même force F
 - le convertisseur de sortie DAØ.
- buffer recevant l'échantillon en flottant, à convertir :
SXHØ (Sortie extérieure "Haut-débit").

L'entrée Ø pourra être reliée à un capteur de force (pont de jauges) qui permettra de capter une impulsion ou une pression du doigt. Le signal analogique variera entre + et - 5V.

L'adaptateur HH1Ø permettra de calibrer l'amplitude de F entre les deux valeurs FG et FP qui seront alors données comme grandeurs de préstructuration quantitative dans PSQN.

Les paramètres de la première cellule, seront également fixés dans PSQN.

La sortie V de la première cellule, est adaptée par HH11, pour évoluer entre K1G et K1P, limites fixées pour l'évolution de la raideur de la deuxième cellule, données, ainsi que Z1, (constante de frottement pour cette même cellule) dans PSQN.

La sortie V de la deuxième cellule est envoyée au convertisseur de sortie DAØ, le signal analogique est donc disponible sur la voie de sortie Ø.

Le dispositif comporte donc :

- 7 entrées de préstructuration quantitative qui seront demadées au début du programme par la subroutine PSQN et qui pourront être modifiées entre plusieurs essais.
- 1 entrée de jeu en temps réel, correspondant à l'excitation en force des deux cellules.
- 1 sortie.

On aurait pu associer Z1, avec un troisième adaptateur HH1, à une deuxième entrée analogique (AD1) qui aurait permis un jeu direct de "modification de structure", faisant varier la constante de frottement de la deuxième cellule, soit le temps d'amortissement du signal obtenu. Nous aurions eu alors : 8 entrées PSQN et 2 entrées de jeu.

c.2/ Description de la structure

Elle se fait alors par un jeu d'instructions codées de manière rudimentaire.

Ces instructions sont de trois types :

1/ Connexion de la sortie S d'un module à l'entrée E d'un autre (ou du même) module :

CONECT S,E

2/ Sauvegarde du contenu du buffer d'un module utilisé de manière multiple :

SVGRD S,M

2'/ Chargement d'une entrée par une mémoire de sauvegarde :

RESTIT M,E

3/ Mise en fonction d'un module :

JP MODULE

La suite des instructions décrivant la structure ci-dessus serait alors :

ADØ	[<u>JP ADØ</u>
HH1Ø	[<u>CONECT EXHØ, H</u> RESTIT C 1Ø, C1 RESTIT C2Ø, C2 <u>JP HH1</u>
CELULE Ø	[RESTIT VØ, V RESTIT WØ, W <u>CONECT H, F</u> RESTIT KØ, K RESTIT ZØ, Z <u>JP CELULE</u> SVGRD V, VØ SVGRD W, WØ
HH11	[<u>CONECT V, H</u> RESTIT C11, C1 RESTIT C21, C2 <u>JP HH1</u>
CELULE 1	[RESTIT V1, V RESTIT W1, W <u>CONECT H, K</u> RESTIT Z1, Z <u>JP CELULE</u> SVGRD V, V1 SVGRD W, W1
ADØ	[<u>CONECT V, SXHØ</u> <u>JP ADØ</u>

Cette suite d'instructions est en fait une suite de "MACROS" instructions qui génèrent le code correspondant à chacun des modules et à chacun des transferts, en langage ASSEMBLER.

Cette partie pourra, ultérieurement, être remplacée par une série d'instructions générées par un compilateur permettant de décrire la structure d'une manière plus facilement lisible et plus condensée (les opérations de sauvegarde et de restitution des "buffers" pourraient ainsi être rendues transparentes pour l'opérateur).

Nous avons voulu aborder seulement ici, d'une première manière assez grossière, cet aspect de la description de la structure, pour montrer toutefois que le langage utilisé peut être lisible tout en restant très proche de la suite des instructions "machines".

Ayant décrit la structure sous cette forme, la suite des instructions correspondantes est insérée dans la boucle de calcul à l'emplacement convenable. On construit ainsi le sous-programme de calcul CORDS 1 en liant les trois parties : COR1, STR, DIS1 où STR représente la suite d'instructions décrite.

Les parties COR1 et DIS1 sont invariantes.

2.3.3.2. DEUXIEME PASSE : LE PROGRAMME CORDS 2

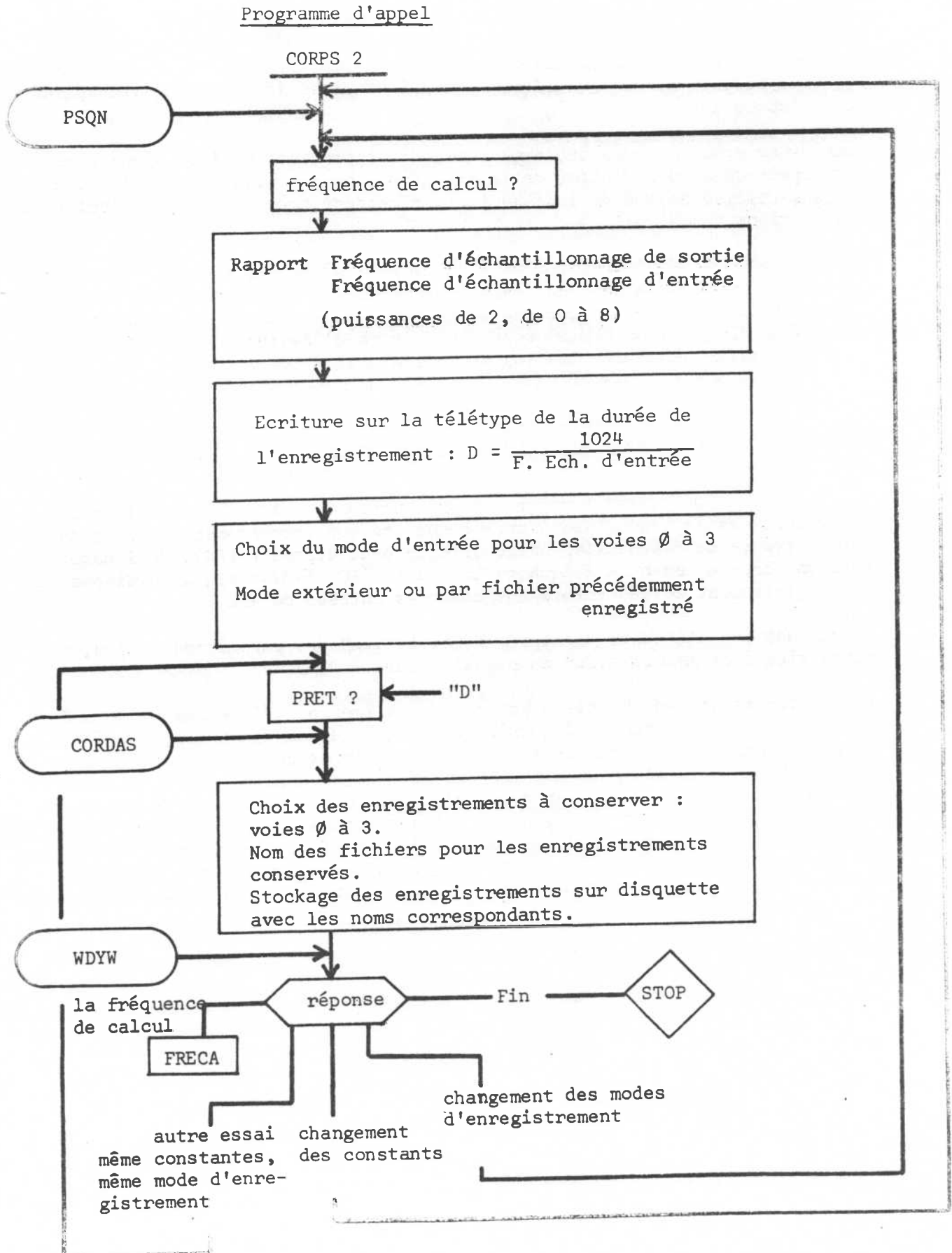
Le but de ce deuxième programme est, partant de la même structure simulée, qu'on aura testée avec CORDS 1 pour connaître son comportement et pour déterminer la fréquence d'échantillonnage qu'elle peut supporter (FC), de l'associer, dans un fonctionnement à fréquence constante (FC ci-dessus), à un dispositif d'enregistrement et de lecture des diverses entrées de jeu.

L'idée est ici d'étudier "l'aspect mémorisation" des paramètres du jeu, par opposition à la mémorisation du signal sonore.

Il est important, en effet, de poser ce problème car, d'une part l'intérêt de mémoriser les variables d'entrée plutôt que celles de sortie, est évident, dans la mesure où les premières sont à bas débit et nécessiteront une capacité de mémoire plus faible pour une même durée du son ; d'autre part, cela permet d'envisager des traitements et des transformations directement au niveau de ces entrées, ce qui est plus général qu'un traitement direct sur les échantillons des signaux obtenus pour la sortie. Si, en effet, la fonction du système de synthèse est bien remplie, c'est au niveau des entrées que l'adaptation entre l'information perceptible dans le signal sonore et la forme des signaux est le mieux réalisée.

La mémorisation du signal sonore sera cependant prise en charge dans le programme CORDS 3. Ce dernier, comme on le verra plus loin, permettra de réaliser le passage nécessaire ici, vu la lenteur du système sous sa forme logicielle, pour produire en temps différé des signaux sonores qui devront donc nécessairement être stockés pour être relus à fréquence d'échantillonnage élevée. Les enregistrements des signaux de commande dans CORDS 2 serviront alors d'entrée dans CORDS 3.

FIGURE 72



Les différents sous-programmes sont :

- * PSQN : identique au cas précédent
- * FRECA : identique au cas précédent
- * CORDAS : boucle de calcul et de mémorisation ou lecture dans quatre tableaux de 1024 mots.
- * WDYW : même principe que précédemment. Les questions sont adaptées cependant aux différents cas propres à CORDS 2.

Choix des modes d'enregistrement ou de lecture

Quatre tableaux de 1024 mots sont réservés en mémoire centrale : HDB0, HDB1, HDB2, HDB3.

Ils permettront : en écriture, d'enregistrer les signaux issus des entrées de commande, dans leur format entier sur 12 bits, en lecture, de fournir les divers échantillons des voies de commande en fonction de la structure établie.

Ils sont :

- en mode écriture, si on désire conserver l'enregistrement, chargés dans des fichiers sur disquette, dont le programme d'appel demande le nom au moment voulu
- en mode lecture, chargés à partir des fichiers disquettes provenant d'enregistrements antérieurs, dont on spécifie le nom au moment voulu.

Les différentes possibilités sont les suivantes :

On dispose de quatre voies susceptibles d'être lues ou enregistrées. Au moment de la détermination du mode d'entrée, on spécifie, pour chacune des quatre voies, si dans l'essai qu'on va faire, elles seront :

* directes : le signal sera alors un signal analogique fourni par un capteur quelconque et injecté à la voie considérée. Dans ce cas, le signal est automatiquement enregistré pendant une certaine durée D (voir plus loin) dans le tableau HDBn. On pourra décider à la fin de l'essai, de le conserver ou non.

* par fichier : dans ce cas, le signal d'entrée n est fourni par le tableau HDBn pendant la durée D. Le programme d'appel demande, pour chacune des voies, si on désire le mode direct ou disquette (par fichier). La durée D de l'enregistrement est déterminée par la dimension des tableaux (1024 mots) et la fréquence d'entrée FE. On peut, selon la valeur de FE, avoir des durées différentes.

Cas typique : $FE = 32 \text{ Hz}$ (fréquence d'échantillonnage des fonctions gestuelles).
On a alors $D = \frac{1024}{32} = 32 \text{ secondes}$.

Sous-programme de calcul CORDS 2

Il est constitué, de même que CORDS 1, en trois parties dont la partie centrale correspond à la description de la structure simulée, identiquement au cas précédent.

La boucle de calcul diffère cependant selon les deux points suivants :

- * La synchronisation par l'horloge programmable et constante est fixée par la fréquence de calcul demandée au début de l'essai, par le programme d'appel. On a donc supprimé ici, le dispositif d'adaptation de cette fréquence.
- * Un dispositif permet de ne conserver des signaux d'entrée que 1 échantillon sur 2^n , n étant fixé par le rapport entre la fréquence de sortie et la fréquence d'entrée.

Exemple : Fréquence de sortie = 512 Hz

$$\text{Rapport } \frac{\text{FE sortie}}{\text{FE entrée}} = 16 : n = 4$$

1 échantillon sur 16 sera stocké dans le mode direct. Dans le mode lecture (ou "disquette"), les échantillons du tableau désigné seront lus tous les 16 tours de boucle et maintenus constants entre temps.

Un perfectionnement du fonctionnement permet également d'interrompre ou de redémarrer le processus d'enregistrement, par action sur le clavier de la télétype, en cours d'opération.

Grâce à ce programme, on peut, après avoir testé la structure à l'aide de CORDS 1, préparer des enregistrements des fonctions de commande sur une durée variant de 2 à 128 secondes (dans ce dernier cas, cependant, l'échantillonnage des fonctions d'entrée est très lent : 8 Hz). Ce sont ces enregistrements qui servent d'entrée dans la troisième PASSE, CORDS 3, permettant, en temps différé le calcul de signaux sonores échantillonnés, pour une durée actuellement limitée par la taille du dispositif de stockage utilisé (la disquette magnétique), soit 10 secondes de son échantillonné à 10 KHz.

(Remarque : une application particulière très simple de ce programme est l'enregistrement et la lecture de signaux de contrôle d'un synthétiseur analogique. Le programme QUADRA permet cette opération sur quatre voies de contrôle simultanées).

2.3.3.3. TROISIEME PASSE, LE PROGRAMME CORDS 3

Il est en grande partie semblable au précédent :

- La définition de la structure est la même que pour CORDS 2, il suffit de reprendre la série des instructions correspondante et de l'insérer dans la boucle de calcul.
- La préstructuration quantitative se fait de la même manière par la sousroutine PSQN.

Les différences portent sur les points suivants liés au mode de fonctionnement :

- Les signaux d'entrée sont donnés par les quatre tableaux définis dans CORDS 2 , chargés au moment voulu, par les fichiers élaborés dans CORDS 2, selon le choix que l'on aura fait.

- La durée de l'enregistrement final est déterminée par la taille de ces tableaux (1024 mots pour chacun) et le taux d'échantillonnage que l'on affecte aux fonctions d'entrée. Ainsi, pour un taux d'échantillonnage de 100 Hz, le signal final, relu à 10 KHz, aura en fait, une durée de 1024/100, soit environ 10 secondes.

Si cette dernière durée dépasse la capacité de la disquette, l'opérateur en est averti et devra choisir une autre fréquence d'échantillonnage pour les entrées.

- Aucun processus de synchronisation n'est nécessaire. Le dispositif faisant appel, dans CORDS 1 et CORDS 2, à l'horloge programmable du LSI 11, a donc été supprimé.

- Les échantillons de sortie sont calculés par blocs de 256 enregistrés au fur et à mesure sur le fichier CORDIS-ECH de la disquette sur laquelle on disposera donc, en fin de calcul, du signal à sonoriser.

L'ensemble des listings correspondant à ces trois programmes peuvent être consultés, nous n'avons pas jugé utile de les faire figurer dans ce rapport.

En annexe à ce rapport, nous pourrions donner quelques exemples de simulations effectuées à l'aide du système CORDIS associé aux divers organes de contrôle gestuel et dans certains cas au synthétiseur analogique, pour un enrichissement des signaux sonores.

Conclusion

L'étude menée ici nous a permis de définir un formalisme de synthèse d'une manière suffisamment avancée pour envisager maintenant, outre les perfectionnements nécessaires au niveau du langage et du mode opératoire, la construction d'un appareil câblé correspondant à ces principes. C'est l'étape à laquelle nous nous attacherons dès maintenant.

- BIBLIOGRAPHIE -

- [1] M. MATHEWS
"The Technology of Computer Music"
The M.I.T. Press. USA (1969)
- [2] P. SCHAEFFER
"Le Traité des Objets Musicaux"
Seuil. Paris (1966)
- [3] P. SCHAEFFER
"La Musique Concrète"
Que sais-je. P.U.F. (1967-1973)
- [4] P. BARBAUD
"Initiation à la Composition Musicale Automatique"
Dunod. Paris (1966)
- [5] I. XENAKIS
"Musiques formelles"
La Revue Musicale
Ed. Richard Masse n° 253-254. Paris (1963)
- [6] J.C. RISSET
Catalogue de sons
- [7] J.C. RISSET
"The development of digital techniques"
Rapport IRCAM 9/78
- [8] "The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation"
Journal of the Audio-Engineering Society
Volume 21 Number 7
- [9] J.C. RISSET
"Paradoxes de Hauteur"
Rapport IRCAM 10/78
- [10] J. PAULUS
"La fonction symbolique et le langage"
Dessart. Bruxelles (1969)
- [11] L. SMITH
"Humanisation of Computer Music" Stanford University
The Journal of the Acoustical Society of America
Vol. 48 n° 1 (July 1970)
- [12] H.G. ALLES, P. DI GIOGNO
"A One-Card 64. Channel Digital Synthesizer"
Computer Music Journal
Volume 1. Number 4 (1977)
- [13] P.A. JAFFRENOU
"Du Synthétiseur Electronique à l'Ordinateur"
Cahiers Recherche/Musique
N° 3. INA-GRM. Paris (1978)
- [14] M. MATHEWS
"The electronic sound studio of the 1970'S"
Music Technologie. UNESCO (1971)

- [15] D.L. WESSEL
"Timbre Space as a Musical Control Structure"
Computer Music Journal
Volume 3. Number 2 (1979)
- [16] J.L. FLORENS
"Coupleur gestuel pour la commande et le contrôle de sons
synthétisés"
Thèse de doctorat 3ème cycle
Institut National Polytechnique de Grenoble (1978)
- [17] C. CADOZ, J.L. FLORENS
"Fondements d'une démarche de recherche Informatique/Musique"
Revue d'Acoustique N° 45 (1978)
- [18] T. BERBERVAN
"Application des systèmes rékursifs à la synthèse sonore"
D.E.A. Soutenu à l'I.N.P.G. -Ecole d'Electronique et de
Radioélectricité- (1979)
- [19] B. GOLD, L. RABINER
"Theory and application of Digital Signal Processing"
- [20] B. GOLD, M. RADER
"Digital Processing of Signals"
Mac. Graw. Hill (1969)
- [21] A.V. OPPENHEIM, R. SCHAFER
"Digital Signal Processing"
Prentice Hall (1975)
- [22] BRAND
"Differential and Difference equations"
- [23] W. L. HENKE
MITSYN : A Graphical Notation and System for the Interactive
Computer-aided Spécification and Realization of Music Synthesis
Quarterly Progress Report n° 105 (1972)

AUTORISATION DE SOUTENANCE

VU les dispositions de l'article 3 de l'arrêté du 16 Avril 1974,

VU le rapport de présentation de Monsieur :

- R. CARRE, Maître de Recherche au C.N.R.S.

Monsieur Claude C A D O Z

est autorisé à présenter une thèse en soutenance pour l'obtention
du titre de DOCTEUR de TROISIEME CYCLE, spécialité "Electronique et
Radiocommunications".

Grenoble, le 1er Octobre 1979

Le Président de l'I.N.P.G.

Ph. TRAYNARD

Président
de l'Institut National Polytechnique

